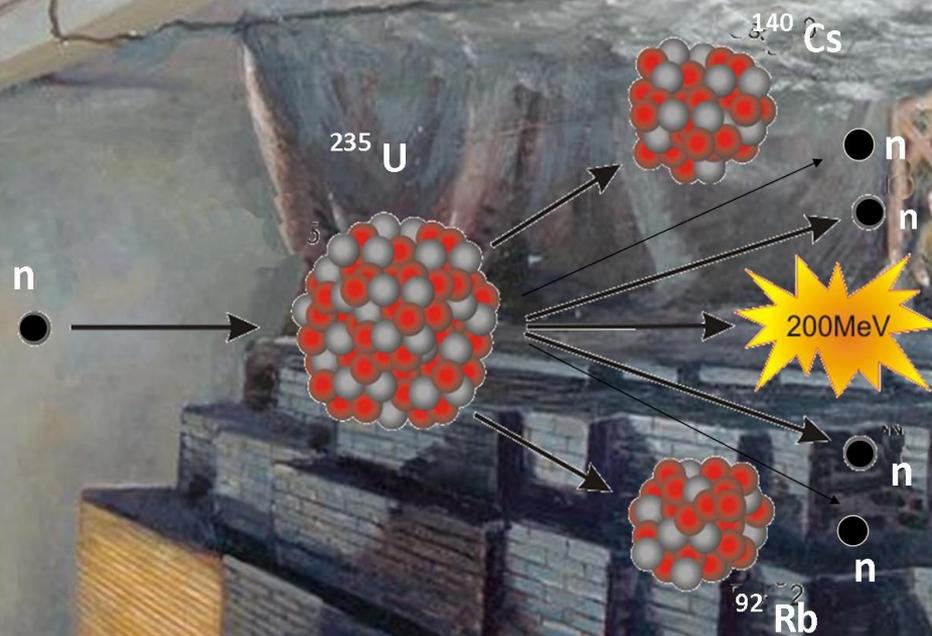


# HISTOIRE DE LA DÉCOUVERTE DE LA FISSION

1938 - 2018 : 80 ans



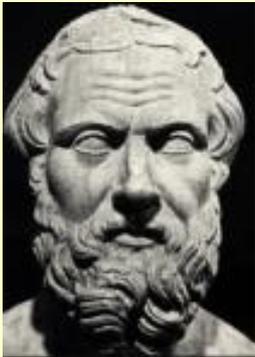
1ère pile de Fermi : 1942

CONFÉRENCE

*par le Pr. Jacques Foos*

UTB Chalon/Saône  
16 janvier 2018

*"Le doux et l'amer, le chaud et le froid, les couleurs ne sont que des apparences. En réalité, il n'y a que les atomes et le vide. Tout ce qui existe résulte des chocs et des combinaisons qui ont lieu entre d'infimes corpuscules insécables, tous faits de la même matière et doués de mouvement, les atomes ... Ces atomes sont invisibles"*



***DÉMOCRITE (vers 460 - vers 370 av J-C)***

*"Car s'il y avait des atomes dans la nature, cela irait contre les plus grands principes de la raison"*



***LEIBNITZ (1646 - 1716)***

# Jusqu'en 1895, peu de progrès par rapport à l'hypothèse de Démocrite

**Le modèle de l'atome est celui de J. J. Thomson :**

**Une petite bille pleine dont les dimensions sont de l'ordre de l'angström : un dixième de milliardième de mètre**



# La situation en 1932 : la connaissance de la nature de la matière a fait beaucoup de progrès

Grâce aux travaux de J. J. Thomson, E. Rutherford, P. et M. Curie, I. et F. Joliot-Curie et J. Chadwick (8 Prix Nobel), on sait que l'atome est en fait constitué d'un noyau autour duquel gravitent les électrons.

L'électron est considéré comme une « *particule fondamentale* » chargée d'électricité négative. Il est peu lié au noyau, ce qui permet des échanges entre atomes pour former des molécules qui elles-mêmes peuvent, dans des conditions physiques bien précises, se transformer : **c'est la base de la Chimie.**

**Ainsi, l'identification d'un élément se fait à partir de ses propriétés chimiques, liées à son nombre d'électrons.**

# La situation en 1932 : la connaissance de la nature de la matière a fait beaucoup de progrès

Le noyau atomique est lui-même constitué de deux « *particules fondamentales* » :

le proton, chargé d'électricité positive et dont le nombre dans le noyau lui permet d'équilibrer la charge négative des électrons, rendant ainsi l'atome neutre, électriquement parlant **et**

le neutron dont le rôle essentiel est d'apporter la force nucléaire qui lie entre eux protons et neutrons dans le noyau, force qui est ***1 million de fois plus grande*** que celle qui lie les électrons au noyau.

# La situation en 1932 : la connaissance de la nature de la matière a fait beaucoup de progrès

**Tout ceci a l'air particulièrement simple. Il explique le grand jeu de construction de la matière avec seulement 3 acteurs.**

**La force nucléaire est immense et hors de portée pour qui voudrait casser des noyaux. Déjà, il faut parfois monter à des températures élevées pour libérer les électrons de leur attraction avec le noyau.**

**Comment pourrait-on briser des noyaux atomiques ?**

**Cela est inimaginable.**

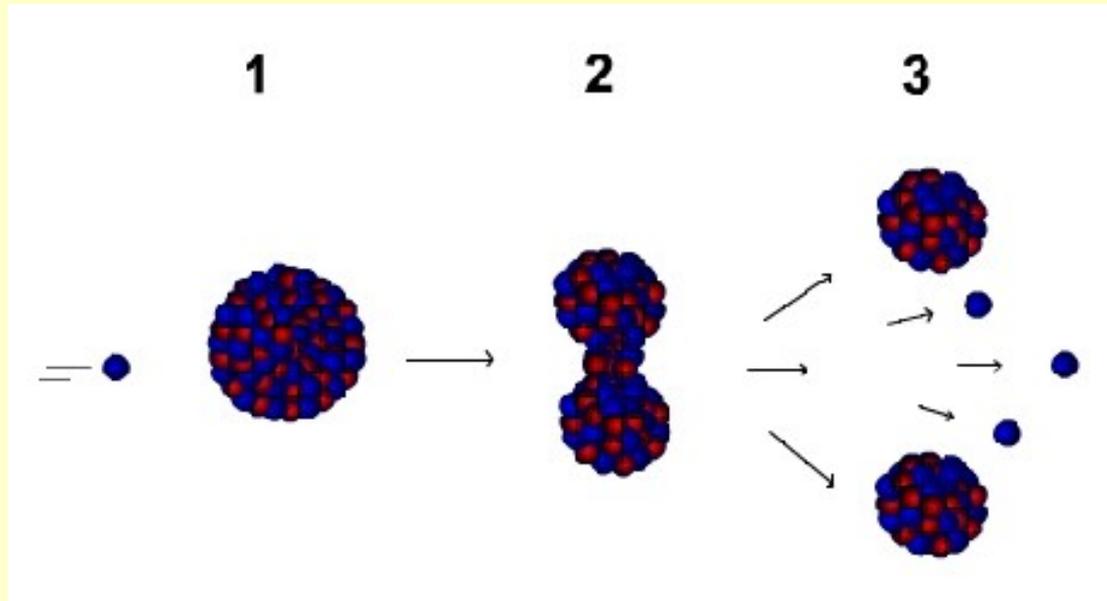
***Cela irait contre les plus grands principes de la Raison !***

**Or, c'est ce qui va se passer dans des expériences où, en plus, on cherche autre chose.**

**Et le noyau va se casser sous l'impact d'un neutron qui va entrer en collision avec un noyau en apportant une énergie très faible : 0,025 eV alors que l'énergie nucléaire qui lie les nucléons entre eux est de l'ordre de plusieurs millions d'eV !**

***Tout ceci explique la suite de l'histoire de cette découverte.***

# La découverte de l'énergie nucléaire : la fission provoquée



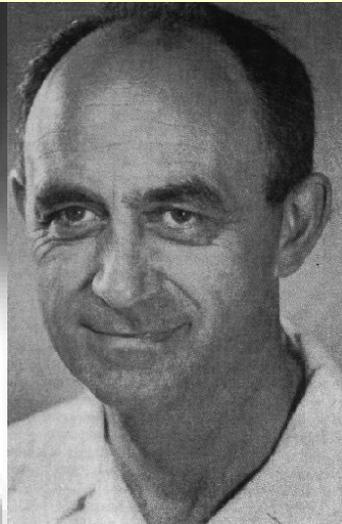
# Les acteurs de la découverte

**J. Chadwick** **E. Fermi**

**O. Hahn**

**L. Meitner**

**I. Joliot-Curie**



# Chadwick et le neutron - 1932



**Cousin du proton, particule  
constitutive du noyau atomique,  
comme lui, à peu près de même masse  
( à  $1/1000^e$  près)**

**MAIS**

***de charge électrique nulle !***

# Le neutron



**Le neutron est donc la particule idéale pour une cible comme le noyau atomique, de charge positive. Il n'y a pas de répulsion entre eux.**

**Si le neutron est assez lent, il va pouvoir facilement être absorbé par le noyau et modifier ainsi sa structure !**

# Le neutron



**S'il est absorbé par un noyau stable, en modifiant sa structure interne, il va lui faire perdre cette stabilité car le noyau « nouveau » aura trop de neutrons !**

**Il transformera alors un de ses neutrons en proton et se déplacera donc d'une place dans la classification périodique.**

# Classification périodique

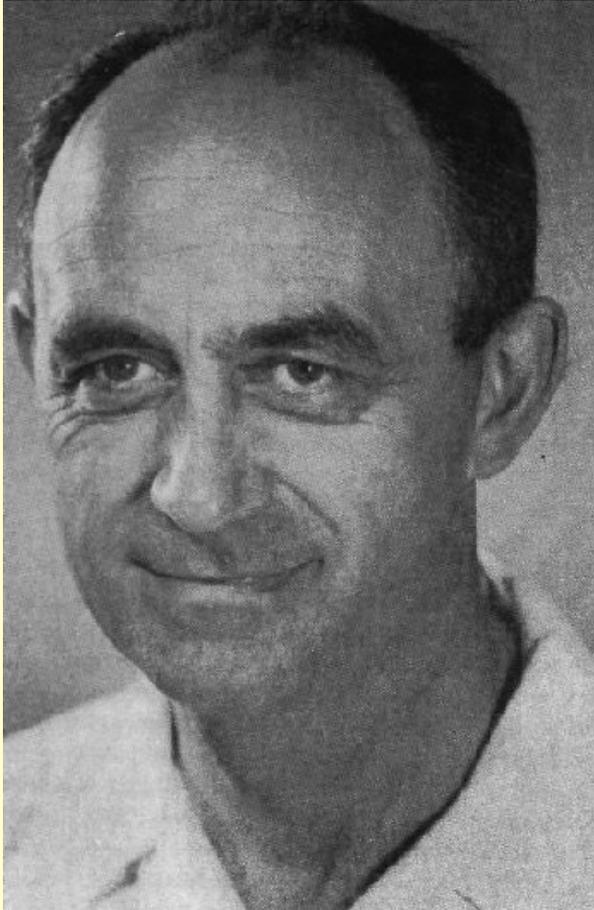
## Classification Périodique

H 1																	He 2
Li 3	Be 4											B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10
Na 11	Mg 12											Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18
K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Co 27	Ni 28	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36
Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54
Cs 55	Ba 56	57 à 71	Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78	Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86
Fr 87	Ra 88	89 à 103	Rf 104	Db 105	Sg 106	Bh 107	Hs 108	Mt 109	Ds 110	Rg 111	Cn 112	Nh 113	Fl 114	Mc 115	Lv 116	Ts 117	Og 118

La 57	Ce 58	Pr 59	Nd 60	Pm 61	Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70	Lu 71
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

Ac 89	Th 90	Pa 91	U 92	Np 93	Pu 94	Am 95	Cm 96	Bk 97	Cf 98	Es 99	Fm 100	Md 101	No 102	Lr 103
----------	----------	----------	---------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	-----------	-----------	-----------	-----------

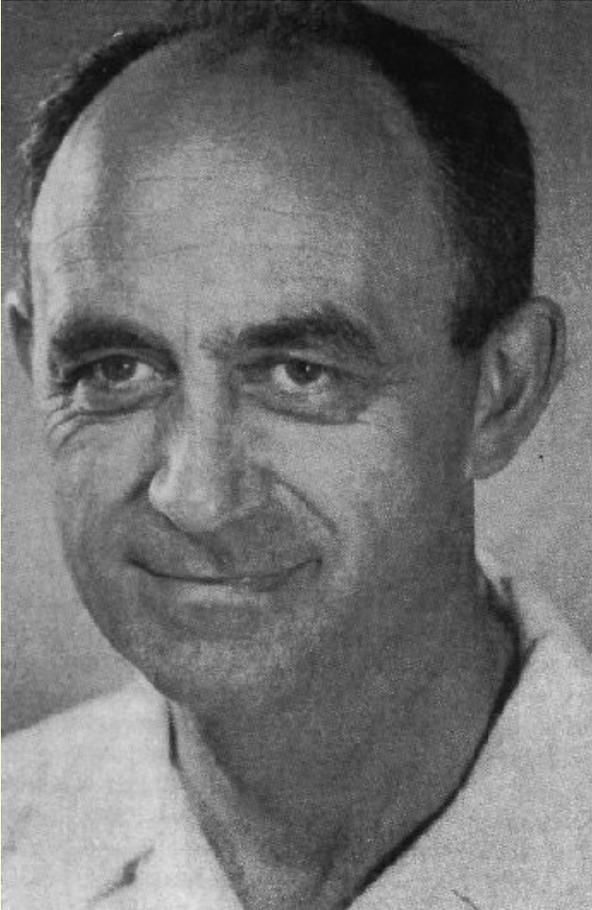
# Fermi et ses réactions nucléaires



Fermi entreprend donc, dès le printemps 1934, de bombardier tous les éléments possibles avec des neutrons **lents** pour étudier le résultat.

Cela donne de nombreuses publications scientifiques concernant la création de nouveaux radioisotopes qu'il faut analyser chimiquement, ce qui ne pose pas de problèmes puisqu'on connaît l'identité de ces derniers.

# Fermi et ses réactions nucléaires



Fermi entreprend donc, dès le printemps 1934, de bombardier tous les éléments possibles avec des neutrons lents pour étudier le résultat.

**Jusqu'au jour où ...**

# Idée géniale de Fermi



Fermi se dit : « Si je bombarde de l'uranium, dernier élément de la classification (dossard 92), avec des neutrons, les noyaux obtenus, devenus instables, vont revenir vers la stabilité en transformant un neutron en proton et donc ... *Je créerai ainsi le premier élément artificiel au delà de l'uranium, dossard 93*

# Classification périodique

## Classification Périodique

H 1																	He 2
Li 3	Be 4											B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10
Na 11	Mg 12											Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18
K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Co 27	Ni 28	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36
Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54
Cs 55	Ba 56	57 à 71	Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78	Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86
Fr 87	Ra 88	89 à 103	Rf 104	Db 105	Sg 106	Bh 107	Hs 108	Mt 109	Ds 110	Rg 111	Cn 112	Nh 113	Fl 114	Mc 115	Lv 116	Ts 117	Og 118

La 57	Ce 58	Pr 59	Nd 60	Pm 61	Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70	Lu 71
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

Ac 89	Th 90	Pa 91	U 92	Np 93	Pu 94	Am 95	Cm 96	Bk 97	Cf 98	Es 99	Fm 100	Md 101	No 102	Lr 103
----------	----------	----------	---------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	-----------	-----------	-----------	-----------



# Idée géniale de Fermi

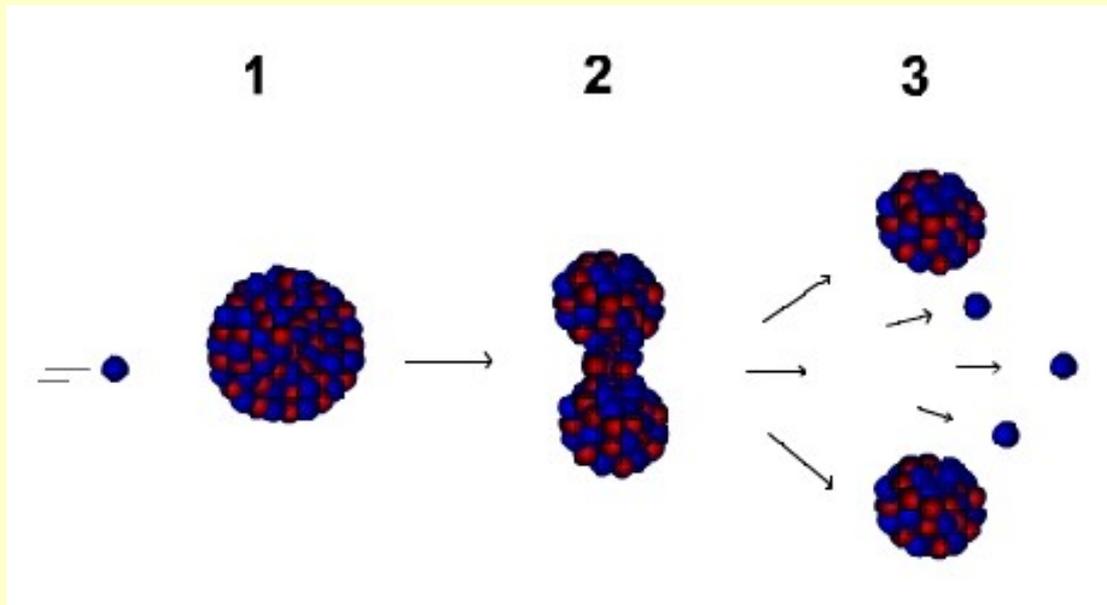


Si ce n'est qu'il va falloir identifier un élément que personne n'a jamais étudié puisqu'il n'existe pas dans la Nature !

*Et c'est là que les ennuis d'Enrico Fermi vont commencer !*

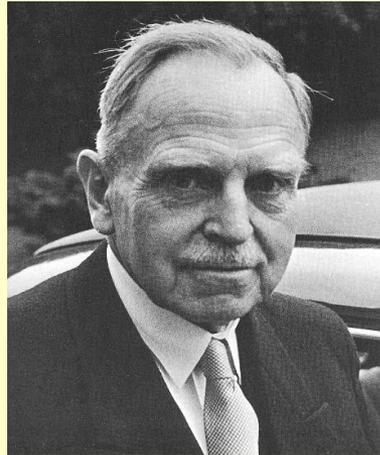
# Débuts des ennuis de Fermi

Comment identifier un nouvel élément : par ses propriétés chimiques. Les ennuis commencent car



# Les laboratoires européens s'en mêlent

Les trois derniers acteurs de cette aventure rentrent alors en piste : une physicienne, Lise Meitner et deux chimistes, Otto Hahn et Irène Joliot-Curie.



Personne n'imagine que le noyau atomique peut se couper en deux et produire de nombreux noyaux plus petits (jusqu'à plusieurs centaines !).

# Classification périodique

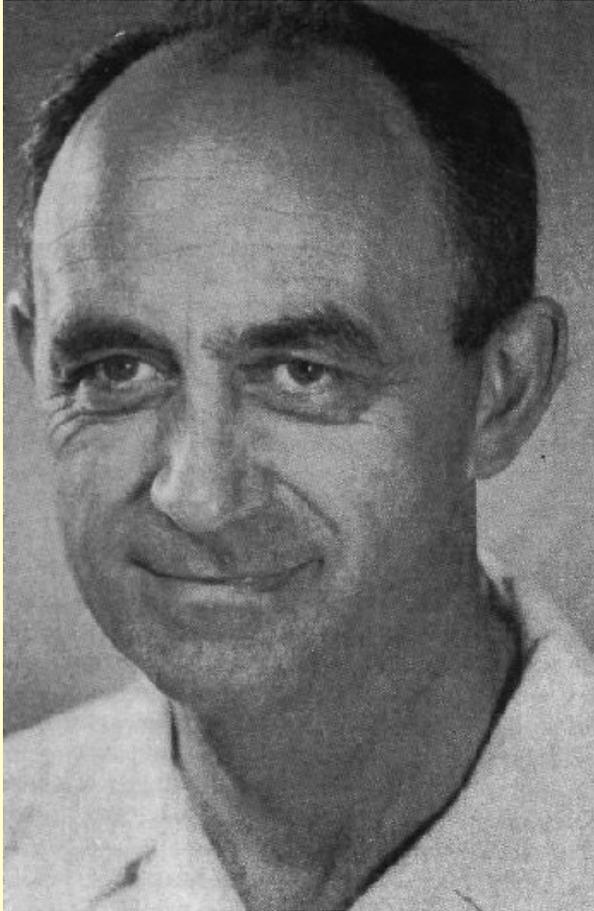
43 éléments ; environ 300 radionucléides différents !

H 1																	He 2						
Li 3	Be 4																	B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10
Na 11	Mg 12																	Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18
K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Co 27	Ni 28	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36						
Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54						
Cs 55	Ba 56	57 à 71	Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78	Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86						
Fr 87	Ra 88	89 à 103	Rf 104	Db 105	Sg 106	Bh 107	Hs 108	Mt 109	Ds 110	Rg 111	Cn 112	Nh 113	Fl 114	Mc 115	Lv 116	Ts 117	Og 118						

La 57	Ce 58	Pr 59	Nd 60	Pm 61	Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70	Lu 71
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

Ac 89	Th 90	Pa 91	U 92	Np 93	Pu 94	Am 95	Cm 96	Bk 97	Cf 98	Es 99	Fm 100	Md 101	No 102	Lr 103
----------	----------	----------	---------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	-----------	-----------	-----------	-----------

# Fermi et ses réactions nucléaires



**Pendant plusieurs années, Fermi va être persuadé qu'il a découvert un ou plusieurs élément(s) au-delà de l'uranium, sans pouvoir le prouver car ce n'est pas un chimiste !**

# Fermi et ses réactions nucléaires

Il ne peut, avec son équipe, que faire une étude « radiométrique ». C'est ainsi qu'à l'été 1934, il met en évidence 4 nouveaux radioéléments de période 10 secondes, 40 secondes, 13 minutes et 1,5 heure.

**Or, les deux derniers ne sont les isotopes d'aucun élément voisin connu.**

Il conclut donc à l'existence de deux éléments « transuraniens », de numéro atomique 93 et 94 qu'il nomme « *ausénium* » et « *hespérium* »

# Ça commence mal !



Aristid Von Grosse, dès le 17 novembre 1934, publie dans *Nature* un article disant que Fermi n'a en fait obtenu que du protactinium, élément 91.

*Cet élément a été découvert en 1917 par Otto Hahn et Lise Meitner et cette publication va les encourager à reprendre les travaux de Fermi.*

# Retour à Enrico Fermi



Très vite (publication du 11 janvier 1935 dans *Naturwissenschaften*), Hahn et Meitner excluent l'hypothèse de Von Grosse. Ils vont même plus loin :

*« ... mais il est facile de voir que les réactions que nous avons décrites excluent non seulement les éléments 90, 91 et 92 mais bien tous les éléments jusqu'au mercure ( $Z = 80$ ) sauf peut-être l'« ékaiode », si bien qu'il apparaît donc très vraisemblable que les éléments de période 13 et 90 minutes sont au-delà de 92. »*

# Retour à Enrico Fermi

Classification Périodique

H 1	[Redacted]																He 2
Li 3	Be 4	[Redacted]										B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10
Na 11	Mg 12	[Redacted]										Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18
K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Co 27	Ni 28	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36
Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54
Cs 55	Ba 56	57 à 71	Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78	Au 79	<del>Hg 80</del>	<del>Tl 81</del>	<del>Pb 82</del>	<del>Bi 83</del>	<del>Po 84</del>	At 85?	<del>Rn 86</del>
Fr 87	Ra 88	89 à 103	Rf 104	Db 105	Sg 106	Bh 107	Hs 108	Mt 109	Ds 110	Rg 111	Cn 112	Nh 113	Fl 114	Mc 115	Lv 116	Ts 117	Og 118

La 57	Ce 58	Pr 59	Nd 60	Pm 61	Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70	Lu 71
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

<del>Cf 98</del>	<del>Am 95</del>	<del>Np 94</del>	<del>Pu 94</del>	Np 93	Pu 94	Am 95	Cm 96	Bk 97	Cf 98	Es 99	Fm 100	Md 101	No 102	Lr 103
----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	-----------	-----------	-----------	-----------

# Retour à Enrico Fermi



*« ...le corps de période 13 minutes pourrait être l'élément 93 et celui de 90 minutes, l'élément 94 étant donné que les deux corps ne sont pas isotopes l'un de l'autre. »*

# Les laboratoires européens s'en mêlent

**Les laboratoires européens s'en mêlent**



**Les laboratoires européens s'emmêlent**

# 1<sup>ère</sup> réaction : Ida Noddack



La chimiste Ida Noddack, déjà connue pour avoir découvert le rhénium (n°75), écrit, suite à cette publication :

**« Il ne faut pas s'arrêter au plomb, comme l'a fait E. Fermi »**

**« Il ne faut pas s'arrêter au mercure, comme l'ont fait O. Hahn et L. Meitner »**

*« Lors de ces désintégrations nucléaires provoquées par des neutrons, ... , il serait concevable que ces noyaux se brisent en plusieurs gros morceaux qui seraient certes des isotopes d'éléments connus, sans être voisins de l'élément irradié. »*

# 1<sup>ère</sup> réaction : Ida Noddack



La chimiste Ida Noddack, déjà connue pour avoir découvert le rhenium (n°75), écrit, suite

Toutefois, I. Noddack, comme l'a n'entreprend aucune expérience et cette hypothèse « peu réaliste » e, comme à l'époque, retombe ner »

« ... ions nucléaires provoqués par des neutrons, ... , il serait concevable que ces noyaux se brisent en plusieurs gros morceaux qui seraient certes des isotopes d'éléments connus, sans être voisins de l'élément irradié. »

# Nouvelle hypothèse de O. Hahn et L. Meitner

On a découvert non pas 2 mais 6 éléments : Th, Pa et U et les 3 éléments suivant l'uranium, les 93 ; 94 et 95 que l'on nomme eka-Re ; eka-Os et eka-Ir.

Classification Périodique

H 1																	He 2
Li 3	Be 4											B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10
Na 11	Mg 12											Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18
K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Co 27	Ni 28	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36
Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54
Cs 55	Ba 56	57 à 71	Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78	Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86
Fr 87	Ra 88	89 à 103	Rf 104	Db 105	Sg 106	Bh 107	Hs 108	Mt 109	Ds 110	Rg 111	Cn 112	Nh 113	Fl 114	Mc 115	Lv 116	Ts 117	Og 118

La 57	Ce 58	Pr 59	Nd 60	Pm 61	Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70	Lu 71
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

Ac 89	Th 90	Pa 91	U 92	Np 93	Pu 94	Am 95	Cm 96	Bk 97	Cf 98	Es 99	Fm 100	Md 101	No 102	Lr 103
----------	----------	----------	---------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	-----------	-----------	-----------	-----------

**Nouvelle hypothèse de O. Hahn et L. Meitner**  
**mars 1936 : premières valeurs de période et identification**  
**(??) des radioisotopes**

<b><math>^{235}\text{Th}</math></b>	<b>4 minutes</b>	<b><i>(7,2 minutes)</i></b>
<b><math>^{235}\text{Pa}</math></b>	<b>très courte ??</b>	<b><i>(24,44 minutes)</i></b>
<b><math>^{235}\text{U}</math></b>	<b>24 minutes</b>	<b><i>(703,7.10<sup>6</sup> ans)</i></b>
<b><math>^{237}\text{U}</math></b>	<b>40 secondes</b>	<b><i>(6,75 jours)</i></b>
<b><math>^{237}\text{EkaRe (93)}</math></b>	<b>16 minutes</b>	<b><i>(2,14.10<sup>6</sup> ans)</i></b>
<b><math>^{237}\text{EkaOs (94)??}</math></b>	<b>12 heures</b>	<b><i>(45,3 jours)</i></b>
<b><math>^{239}\text{U}</math></b>	<b>10 secondes</b>	<b><i>(23,54 minutes)</i></b>
<b><math>^{239}\text{EkaRe (93)}</math></b>	<b>2,2 minutes</b>	<b><i>(2,36 jours)</i></b>
<b><math>^{239}\text{EkaOs (94)}</math></b>	<b>59 minutes</b>	<b><i>(24 110 ans)</i></b>
<b><math>^{239}\text{EkaIr (95)}</math></b>	<b>3 jours</b>	<b><i>(11,9 heures)</i></b>

# Nouvelle hypothèse de O. Hahn et L. Meitner

mars 1936 : premières valeurs de période et identification  
(??) des radioisotopes

$^{235}\text{Th}$	4 minutes	(7,2 minutes)
$^{235}\text{Pa}$	très courte	(24,44 minutes)
$^{235}\text{U}$		( $7 \cdot 10^6$ ans)
$^{237}\text{U}$		(ans)
$^{237}\text{EkaR}$		(ans)
$^{237}\text{EkaO}$		(ans)
$^{239}\text{U}$		(minutes)
$^{239}\text{EkaRe (93)}$		(50 jours)
$^{239}\text{EkaOs (94)}$	59 minutes	(24 110 ans)
$^{239}\text{EkaIr (95)}$	3 jours	(11,9 heures)

Mais alors : pourquoi n'observe-t-on aucune désintégration  $\alpha$ , mode de désintégration très fréquent des noyaux de  $Z > 200$  ?

**Un troisième chercheur, trentenaire, Fritz Strassmann, se joint au duo Hahn-Meitner. C'est un radiochimiste déjà réputé à cette époque.**



## À l'Institut du radium (Paris)

**Irène Joliot-Curie** entreprend à son tour d'étudier les substances radioactives produites en bombardant de l'uranium avec des neutrons.

Problème : l'extrême pureté de l'uranium sur lequel travaille O. Hahn ne suffit pas car celui-ci se contamine tout seul avec ses descendants qu'il produit à chacune de ses désintégrations, dont un est très gênant : le thorium-234.

Elle décide, contrairement à O. Hahn d'interposer des écrans entre la source et le détecteur de façon à arrêter les rayonnements de ce thorium-234 tout en laissant « passer » d'autres rayonnements éventuels à la condition qu'ils soient plus énergétiques.

**Et ça marche !!**

## À l'Institut du radium (Paris)

L'équipe d'Irène Joliot-Curie découvre l'émission de rayonnements provenant d'un radioélément non décrit par Hahn et Meitner de période égale à 3,5 heures qu'elle appelle

**R<sub>3,5h</sub>**

Suit une publication qui explique la formation de cet élément qui ne peut être que du thorium, probablement l'isotope 235 suite à la capture d'un neutron par l'uranium-238 et l'éjection d'une particule  $\alpha$  :



Hahn et Meitner, incrédules, vérifient cette affirmation et l'infirmement ! Il n'y a pas un seul corps de période 3,5 h mais 2 : l'un de période 2 heures, l'autre de période plus longue.

**Ils envoient une belle lettre à Irène**

Berlin-Dahlem, le 20.1.1938

Chère Madame Curie,

Le motif de notre lettre est le travail que vous avez publié... dans lequel vous mentionnez un isotope du thorium, ce qui a suscité de notre part un intérêt particulier.

Étant donné que nous croyons avoir des preuves très convaincantes que ces corps n'existent pas, nous aimerions vous faire part de quelques-uns de nos arguments....

Nous aimerions connaître votre opinion sur les arguments développés ci-dessus. Si vous vous rangiez à notre avis, le plus simple serait que vous publiiez une note dans votre revue. Dans ce cas, nous ne publierions rien sur le sujet.

Avec nos meilleures salutations ainsi qu'à M. Joliot.

Vos

Lise Meitner    Otto Hahn

# Échange de balles !

I. Joliot Curie admet que le radioélément qu'elle a mis en évidence n'est pas du thorium mais .. étrangement, il a les propriétés chimiques d'une Terre Rare, ce qui semble impossible !

Classification Périodique

H 1																	He 2
Li 3	Be 4											B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10
Na 11	Mg 12											Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18
K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Co 27	Ni 28	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36
Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54
Cs 55	Ba 56	57 à 71	Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78	Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86
Fr 87	Ra 88	89 à 103	Rf 104	Db 105	Sg 106	Bh 107	Hs 108	Mt 109	Ds 110	Rg 111	Cn 112	Nh 113	Fl 114	Mc 115	Lv 116	Ts 117	Og 118



La 57	Ce 58	Pr 59	Nd 60	Pm 61	Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70	Lu 71
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

Ac 89	Th 90	Pa 91	U 92	Np 93	Pu 94	Am 95	Cm 96	Bk 97	Cf 98	Es 99	Fm 100	Md 101	No 102	Lr 103
----------	----------	----------	---------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	-----------	-----------	-----------	-----------

# Échange de balles !

Le 21 mars 1938, dans une note, I. Joliot-Curie se range du côté des Allemands en écrivant que cet élément ne peut être qu'un transuraniens, *en indiquant toutefois qu'il aurait des propriétés très différentes de ce qu'on pense alors de ces transuraniens qu'on imagine avoir découverts.*

Classification Périodique

H 1																	He 2
Li 3	Be 4											B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10
Na 11	Mg 12											Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18
K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Co 27	Ni 28	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36
Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54
Cs 55	Ba 56	57 a 71	Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78	Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86
Fr 87	Ra 88	89 a 103	Rf 104	Db 105	Sg 106	Bh 107	Hs 108	Mt 109	Ds 110	Rg 111	Cn 112	Nh 113	Fl 114	Mc 115	Lv 116	Ts 117	Og 118

La 57	Ce 58	Pr 59	Nd 60	Pm 61	Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70	Lu 71
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

Ac 89	Th 90	Pa 91	U 92	Np 93	Pu 94	Am 95	Cm 96	Bk 97	Cf 98	Es 99	Fm 100	Md 101	No 102	Lr 103
----------	----------	----------	---------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	-----------	-----------	-----------	-----------

# Échange de balles !

Les chercheurs allemands pensent alors, sans citer du tout les travaux des Français que les propriétés chimiques nouvelles de cet élément se rapprochent de celles de l'iridium.

Classification Périodique

H 1																	He 2
Li 3	Be 4											B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10
Na 11	Mg 12											Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18
K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Co 27	Ni 28	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36
Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54
Cs 55	Ba 56	57 à 71	Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78	Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86
Fr 87	Ra 88	89 à 103	Rf 104	Db 105	Sg 106	Bh 107	Hs 108	Mt 109	Ds 110	Rg 111	Cn 112	Nh 113	Fl 114	Mc 115	Lv 116	Ts 117	Og 118

La 57	Ce 58	Pr 59	Nd 60	Pm 61	Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70	Lu 71
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

Ac 89	Th 90	Pa 91	U 92	Np 93	Pu 94	Am 95	Cm 96	Bk 97	Cf 98	Es 99	Fm 100	Md 101	No 102	Lr 103
----------	----------	----------	---------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	-----------	-----------	-----------	-----------

# Échange de balles !

Les chercheurs allemands pensent alors, sans citer du tout les travaux des Français que les propriétés chimiques nouvelles de cet élément se rapprochent de celles de l'iridium. **Ils proposent donc l'existence d'un eka-iridium**

Classification Périodique

H 1																	He 2
Li 3	Be 4											B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10
Na 11	Mg 12											Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18
K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Co 27	Ni 28	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36
Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54
Cs 55	Ba 56	57 à 71	Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	<b>Ir 77</b>	Pt 78	Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86
Fr 87	Ra 88	89 à 103	Rf 104	Db 105	Sg 106	Bh 107	Hs 108	Mt 109	Ds 110	Rg 111	Cn 112	Nh 113	Fl 114	Mc 115	Lv 116	Ts 117	Og 118

La 57	Ce 58	Pr 59	Nd 60	Pm 61	Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70	Lu 71
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

Ac 89	Th 90	Pa 91	U 92	Np 93	Pu 94	<b>Am 95</b>	Cm 96	Bk 97	Cf 98	Es 99	Fm 100	Md 101	No 102	Lr 103
----------	----------	----------	---------	----------	----------	------------------	----------	----------	----------	----------	-----------	-----------	-----------	-----------

## 12 mars 1938 : Hitler envahit l'Autriche.

Lise Meitner doit fuir l'Allemagne nazi, n'étant plus protégée par son passeport autrichien.

Elle se réfugie en Suède. 30 ans de travail au *Kaiser Wilhelm Institut* se terminent de façon abrupte à un moment où ses recherches avec Otto Hahn (très affecté par cette séparation) revêtaient une grande importance.

Une correspondance régulière entre les deux chercheurs vont leur permettre toutefois de rester en contact.

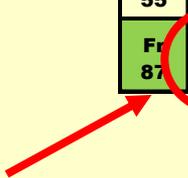
F. Strassmann et O. Hahn reprennent ces travaux.

# Échange de balles !

Pour les chercheurs allemands, le radioélément de période 3,5 heures n'est pas l'eka-iridium. Pour eux ce serait un mélange de deux corps dont l'un serait du **radium**, proche chimiquement du **baryum** et du **lanthane**, ce qui expliquerait les « *erreurs d'interprétation des Français* » !

Classification Périodique

H 1																	He 2
Li 3	Be 4											B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10
Na 11	Mg 12											Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18
K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Co 27	Ni 28	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36
Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54
Cs 55	Ba 56	57 à 71	Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78	Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86
Fr 87	Ra 88	89 à 103	Rf 104	Db 105	Sg 106	Bh 107	Hs 108	Mt 109	Ds 110	Rg 111	Cn 112	Nh 113	Fl 114	Mc 115	Lv 116	Ts 117	Og 118



La 57	Ce 58	Pr 59	Nd 60	Pm 61	Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70	Lu 71
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

Ac 89	Th 90	Pa 91	U 92	Np 93	Pu 94	Am 95	Cm 96	Bk 97	Cf 98	Es 99	Fm 100	Md 101	No 102	Lr 103
----------	----------	----------	---------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	-----------	-----------	-----------	-----------

# Échange de balles !

Pour les chercheurs allemands, le radioélément de période 3,5 heures n'est pas l'eka-iridium. Pour eux ce serait un mélange de deux corps dont l'un serait du **radium**, proche chimiquement du **baryum** et du **lanthane**, ce qui expliquerait les « *erreurs d'interprétation* ».

Toutefois, cette hypothèse est battu en brèche par Niels Bohr et Lise Meitner qu'Otto Hahn rencontre à Copenhague le 13 novembre 1938

H 1																	
Li 3																	
Na 11																	
K 19																	
Rb 37	Sr 38	39														Xe 54	
Cs 55	Ba 56	57 a 71	Hf 72	73	74								Po 84	At 85	Rn 86		
Fr 87	Ra 88	89 a 103	Rf 104	Db 105	Sg 106	Bh 107	Hs 108	Mt 109	Ds 110	Rg 111	Cn 112	Nh 113	Fl 114	Mc 115	Lv 116	Ts 117	Og 118

La 57	Ce 58	Pr 59	Nd 60	Pm 61	Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70	Lu 71
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

Ac 89	Th 90	Pa 91	U 92	Np 93	Pu 94	Am 95	Cm 96	Bk 97	Cf 98	Es 99	Fm 100	Md 101	No 102	Lr 103
----------	----------	----------	---------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	-----------	-----------	-----------	-----------

# Échange de balles !

Irène Joliot-Curie émet l'hypothèse, après avoir fait de nouvelles expériences, que son radioélément de période 3,5 h est du **radio-lanthane**!

Idée jugée poliment absurde par les autres !

Classification Périodique

H 1																	He 2
Li 3	Be 4											B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10
Na 11	Mg 12											Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18
K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Co 27	Ni 28	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36
Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54
Cs 55	Ba 56	57 à 71	Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78	Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86
Fr 87	Ra 88	89 à 103	Rf 104	Db 105	Sg 106	Bh 107	Hs 108	Mt 109	Ds 110	Rg 111	Cn 112	Nh 113	Fl 114	Mc 115	Lv 116	Ts 117	Og 118

→

La 57	Ce 58	Pr 59	Nd 60	Pm 61	Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70	Lu 71
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

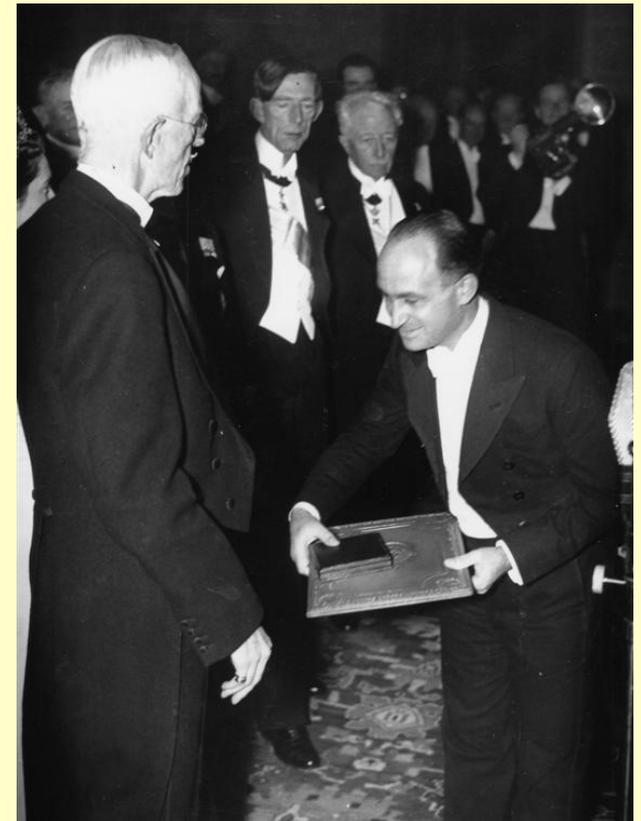
Ac 89	Th 90	Pa 91	U 92	Np 93	Pu 94	Am 95	Cm 96	Bk 97	Cf 98	Es 99	Fm 100	Md 101	No 102	Lr 103
----------	----------	----------	---------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	-----------	-----------	-----------	-----------

# Pendant ce temps, à Stockholm, Fermi perd patience

Cette même semaine, dans son discours Nobel de 1938, il succombe à la tentation à laquelle il avait résisté jusque là : il déclare avoir créé les 2 éléments suivant l'uranium et les nomme **ausénium (Ao)** et **hesperium (Es)**.



*Professeur Jacques Foos -15 janvier 2018*



## 12 décembre 1938 : conférence Nobel d'Enrico Fermi

*« L'uranium et le thorium montrent une assez forte activité induite par un bombardement avec des neutrons, et dans les deux cas, la courbe de décroissance de l'activité montre que plusieurs nucléides radioactifs, avec des durées de vie moyennes différentes, sont produits.*

*Nous avons tenté, depuis le printemps 1934, d'isoler chimiquement ces nucléides responsables de cette radioactivité avec pour conséquence que ces radioéléments ne sont ni des isotopes de l'uranium lui-même, ni des éléments plus légers que l'uranium en dessous de l'élément de numéro atomique 86 (le radon) .....*

## 12 décembre 1938 : conférence Nobel d'Enrico Fermi

*.... Nous avons conclu que ces radionucléides étaient un ou plusieurs éléments de numéro atomique supérieur à 92.*

*Nous, à Rome, avons pris l'habitude d'appeler les éléments 93 et 94, Ausenium et Hesperium respectivement.*

*Il est connu qu'Otto Hahn et Lise Meitner ont étudié très attentivement et largement les produits de désintégration de l'uranium irradié et ont pu retrouver parmi eux des éléments jusqu'au numéro atomique 96. »*

# Échange de balles !

Irène Joliot-Curie émet l'hypothèse, après avoir fait de nouvelles expériences, que son radioélément de période 3,5 h est du **radio-lanthane**!

Idée jugée poliment absurde par les autres !

Classification Périodique

H 1																	He 2
Li 3	Be 4											B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10
Na 11	Mg 12											Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18
K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Co 27	Ni 28	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36
Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54
Cs 55	Ba 56	57 à 71	Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78	Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86
Fr 87	Ra 88	89 à 103	Rf 104	Db 105	Sg 106	Bh 107	Hs 108	Mt 109	Ds 110	Rg 111	Cn 112	Nh 113	Fl 114	Mc 115	Lv 116	Ts 117	Og 118

La 57	Ce 58	Pr 59	Nd 60	Pm 61	Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70	Lu 71
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

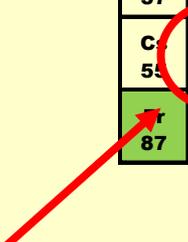
Ac 89	Th 90	Pa 91	U 92	Np 93	Pu 94	Am 95	Cm 96	Bk 97	Cf 98	Es 99	Fm 100	Md 101	No 102	Lr 103
----------	----------	----------	---------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	-----------	-----------	-----------	-----------

# Le curiosium

Otto Hahn se moque gentiment d'Irène Joliot-Curie :  
 « Elle a découvert le curiosium ! » et reprend ses travaux sur le  
 « radium » pour démontrer son erreur mais ... constate que  
 « son » radium est en fait *du baryum* !

Classification Périodique

H 1																	He 2
Li 3	Be 4											B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10
Na 11	Mg 12											Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18
K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Co 27	Ni 28	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36
Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54
Cs 55	Ba 56	La 57 à 71	Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78	Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86
Fr 87	Ra 88	Ac 89 à 103	Rf 104	Db 105	Sg 106	Bh 107	Hs 108	Mt 109	Ds 110	Rg 111	Cn 112	Nh 113	Fl 114	Mc 115	Lv 116	Ts 117	Og 118



La 57	Ce 58	Pr 59	Nd 60	Pm 61	Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70	Lu 71
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

Ac 89	Th 90	Pa 91	U 92	Np 93	Pu 94	Am 95	Cm 96	Bk 97	Cf 98	Es 99	Fm 100	Md 101	No 102	Lr 103
----------	----------	----------	---------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	-----------	-----------	-----------	-----------



Lundi soir, le 19 décembre (1938), au laboratoire....

Il se passe en effet quelque chose de tellement incroyable avec les « isotopes du radium » que nous te le disons qu'à toi ... on peut les séparer de tous les éléments sauf du baryum ; ... nos isotopes du radium se comportent comme du baryum ! .....

Peut-être peux-tu proposer quelque explication fantastique ? Nous savons nous-même que l'uranium ne peut vraiment pas donner du baryum en éclatant. Nous allons vérifier si les isotopes de l'actinium issus de la désintégration du radium se comportent non pas comme de l'actinium mais comme du lanthane. Sujet très délicat ! Mais nous devons éclaircir tout cela ...

Réfléchis donc de ton côté ; tu peux penser à une possibilité quelconque. ... Si tu pouvais proposer quelque chose que tu pourrais publier, ce serait comme si on travaillait encore tous les trois ! Nous croyons être ni devenus fous, ni frappés d'une quelconque affection !

Lundi soir, le 19 décembre (1938), au laboratoire....

Il se passe en effet quelque chose de tellement incroyable avec les « isotopes du radium » que nous te le disons qu'à toi ... on peut les séparer de tous les éléments sauf du baryum ; ... nos isotopes du radium se comportent

Peut-être une réaction fantastique ?

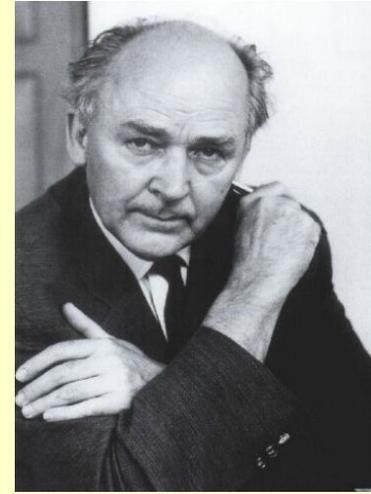
Nous savons que ça ne peut pas donner du baryum et des isotopes de l'actinium. Ils se comportent non pas comme le baryum. Sujet très délicat ! M

**Et le 22 décembre ....**

Réfléchis à une possibilité quelconque. ... Si tu trouves quelque chose que tu pourrais publier, ce serait comme si on travaillait encore tous les trois ! Nous croyons être ni devenus fous, ni frapper d'une quelconque affection !



Publication du 22 décembre 1938  
(Otto Hahn et Fritz Strassman)  
à *Naturwissenschaften*



« Sur la mise en évidence et le comportement de métaux alcalino-terreux lors de l'irradiation de l'uranium par des neutrons »

« En accord avec I. Curie ... et en tant que chimistes, nous devrions renommer le schéma proposé et mettre les symboles Ba, La et Ce à la place de Ra, Ac et Th. En tant que « chimistes nucléaires », proches d'une certaine manière de la physique, nous ne sommes pas encore prêts à franchir ce pas, contraire à toutes les expériences connues à ce jour en physique nucléaire. Il serait encore possible, malgré tout, qu'une série d'improbables coïncidences ait entaché d'erreurs nos résultats. »

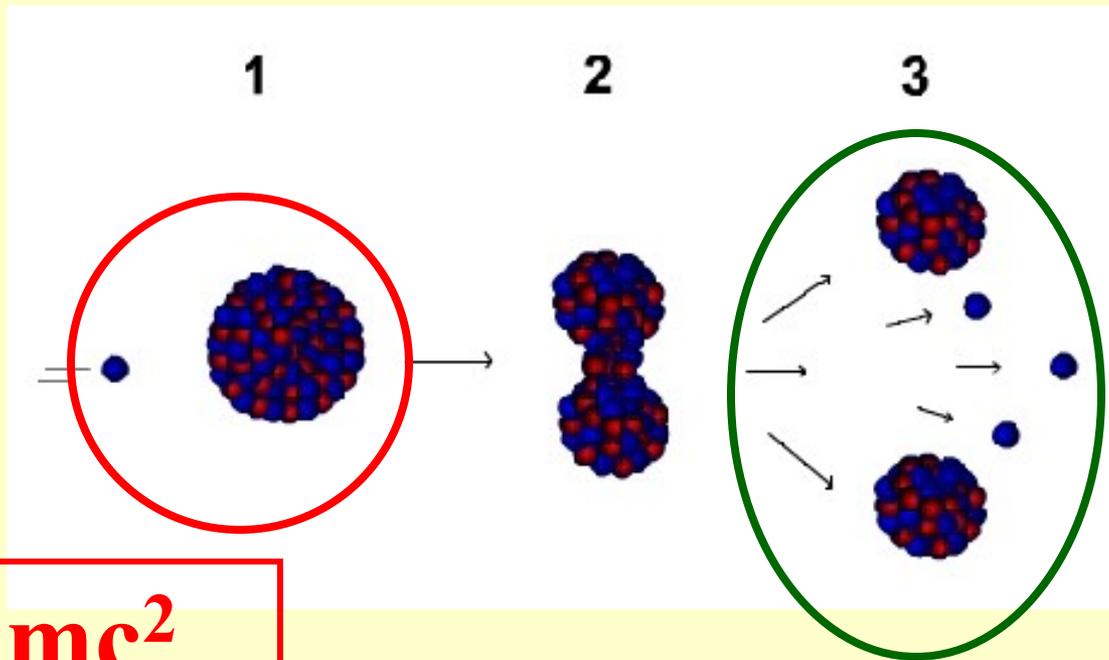
# Lise Meitner et Otto Frisch résolvent l'énigme

Comment imaginer obtenir des noyaux nettement plus petits que l'uranium ?



# Lise Meitner et Otto Frisch résolvent l'énigme

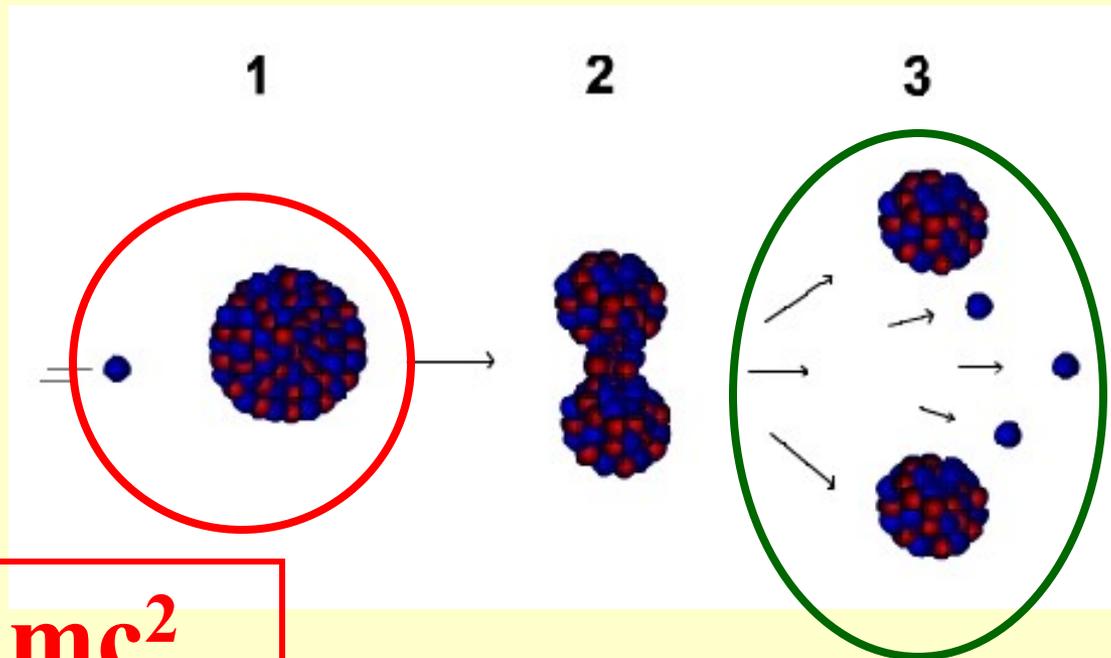
Si la somme des masses du neutron et du noyau d'uranium est supérieure à la somme des masses des noyaux et particules résultantes, c'est donc que cette réaction fournit de l'énergie et qu'elle est possible !



$$E = mc^2$$

# Lise Meitner et Otto Frisch résolvent l'énigme

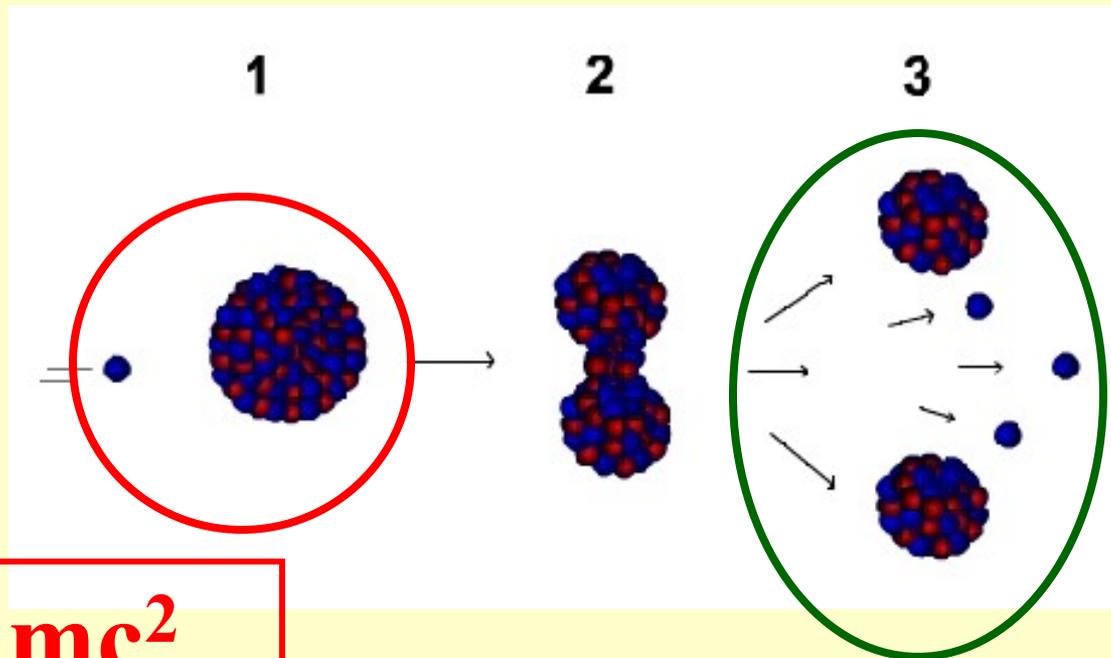
Or, la différence de masse entre les produits finals (qu'on appellera plus tard : produits de fission) et les réactifs initiaux (noyau d'uranium + 1 neutron) correspond à 1/5 de la masse d'un proton, ce qui donne une énergie d'environ 200 MeV



$$E = mc^2$$

# Lise Meitner et Otto Frisch résolvent l'énigme

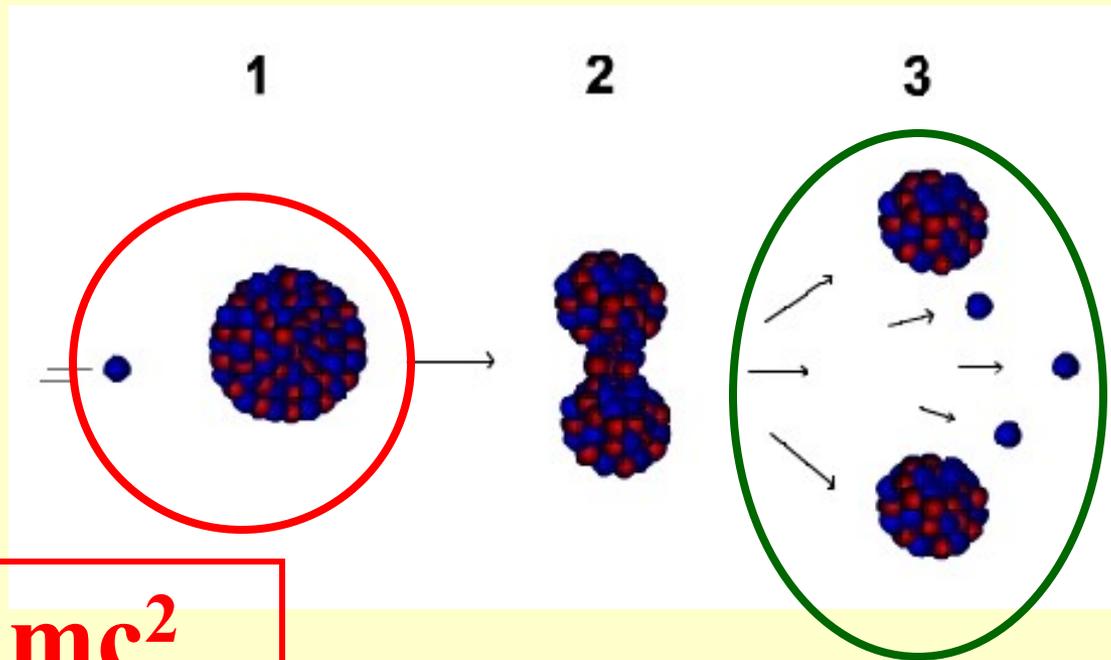
Le second calcul se fait à partir des différences d'énergies de liaison entre les différents protagonistes :  
on trouve **une énergie de 200 MeV**



$$E = mc^2$$

# Lise Meitner et Otto Frisch résolvent l'énigme

Enfin, l'un des deux modèles qui servent à décrire le noyau, le modèle « de la goutte liquide », dû à Hans Bethe et Carl Friedrich Von Weizsäcker, permet d'imaginer très facilement cette fission.



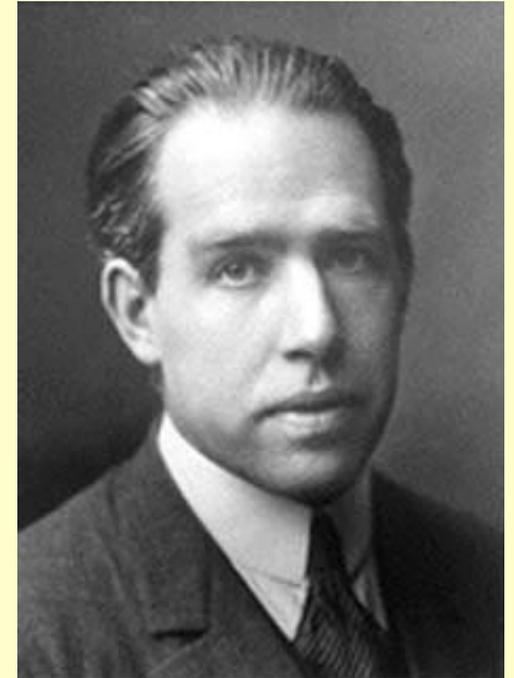
$$E = mc^2$$

# Otto Frisch rencontre Niels Bohr

*« Mais quels imbéciles  
avons-nous été ! Mais  
c'est magnifique ! C'est  
exactement comme ça  
que cela doit être ! »*

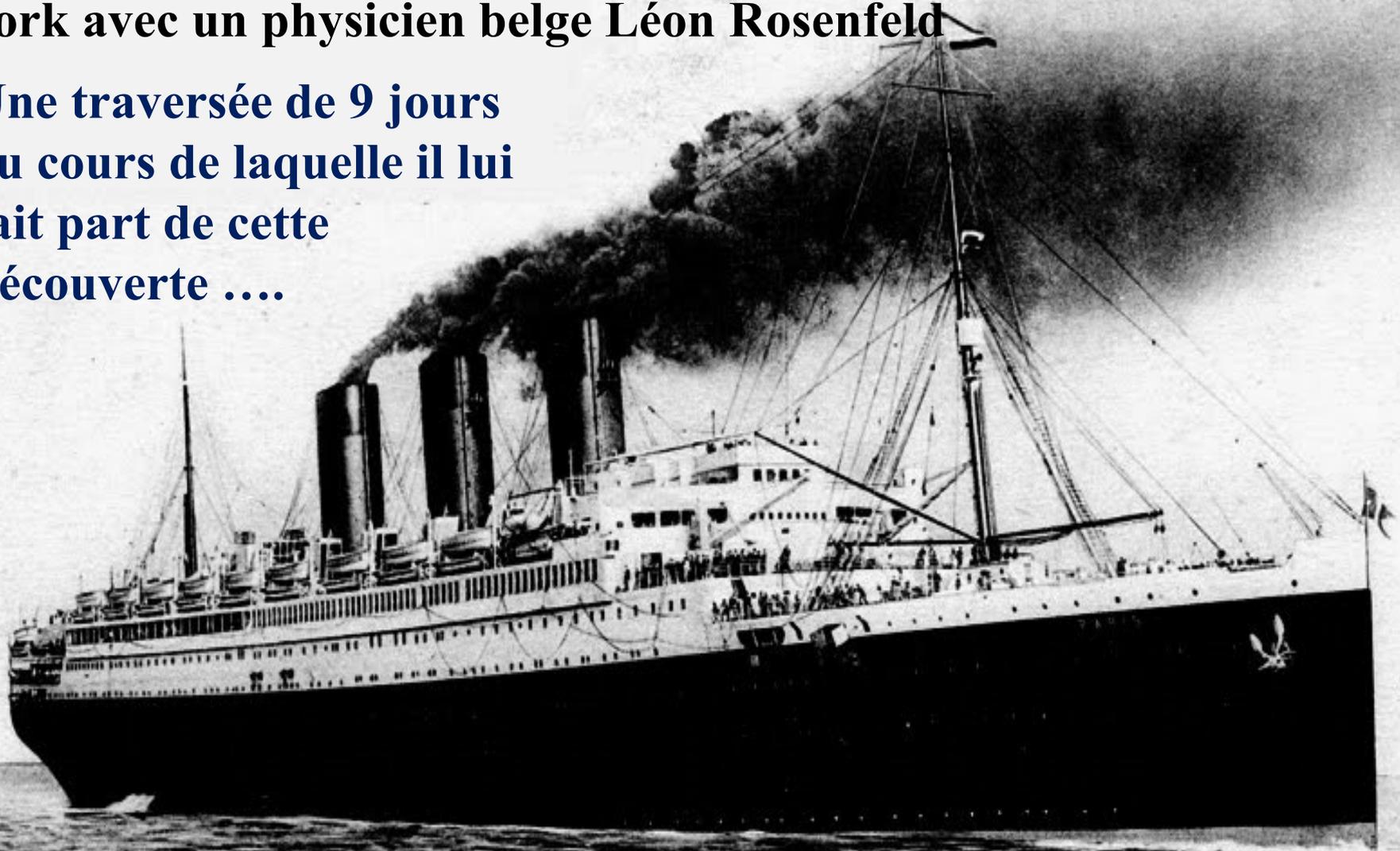
**Le 7 janvier 1939, Otto  
Frisch donne à Niels  
Bohr l'ébauche de  
l'article qu'ils comptent  
faire paraître dans  
Nature.**

**Bohr promet de n'en  
parler à personne**



**N. Bohr embarque le 7 janvier 1939 sur le *Drottningholm* pour New York avec un physicien belge Léon Rosenfeld**

**Une traversée de 9 jours  
au cours de laquelle il lui  
fait part de cette  
découverte ....**



**N. Bohr embarque le 7 janvier 1939 sur le *Drottningholm* pour New York avec un physicien belge Léon Rosenfeld**

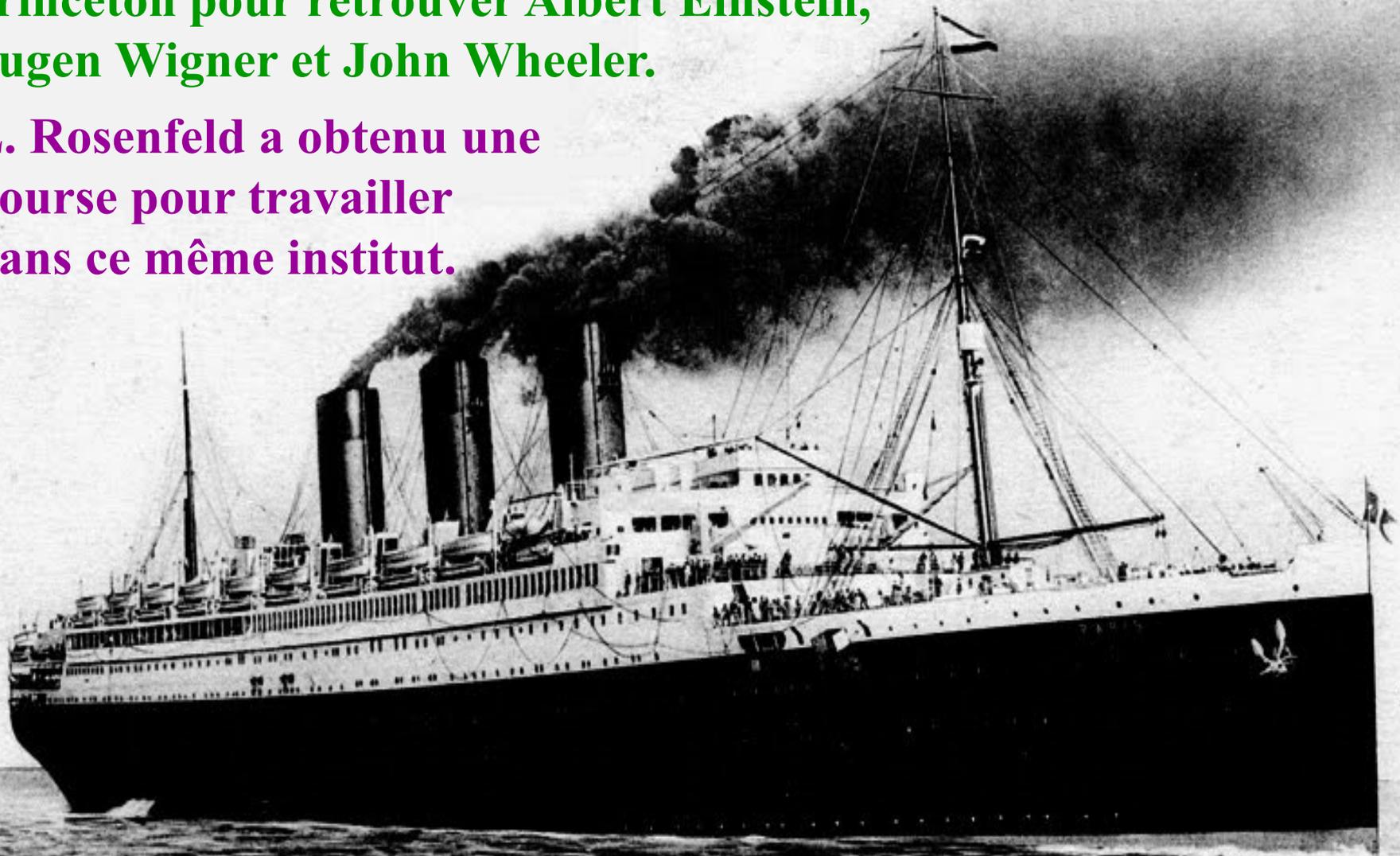
**Une traversée de 9 jours au cours de laquelle il lui fait part de cette découverte**



**En oubliant de lui signaler de la tenir secrète tant que L. Meitner et O. Frisch n'auront pas fait paraître leur article !**

**N. Bohr a prévu de passer 6 mois à l'*Institute for Advanced Study* de Princeton pour retrouver Albert Einstein, Eugen Wigner et John Wheeler.**

**L. Rosenfeld a obtenu une bourse pour travailler dans ce même institut.**



# Ils sont accueillis par Laura et Enrico Fermi et par John Wheeler



**N. Bohr reste quelques jours chez les Fermi alors que L. Rosenfeld prend immédiatement le chemin de Princeton.**

**Il s'empresse de tenir Wheeler au courant des travaux de Hahn et Strassman ainsi que l'interprétation de Meitner et Frisch.**



**Cette nouvelle fait l'effet d'un coup de tonnerre chez tous les physiciens américains, au grand dam de Niels Bohr qui s'impatiente en ne voyant pas sortir l'article de Frisch et Meitner.**

**Celui-ci ne sortira que le 11 février 1939**

**Or, le 26 janvier 1939 se tient une conférence de physique théorique à Washington.**

**Fermi quitte New York pour participer à cette conférence avant le lancement des expériences sur la fission à l'Université de Columbia.**

**Bohr et Fermi discute du problème de la fission et Fermi mentionne en particulier la possibilité que des neutrons puissent être émis durant le processus.**

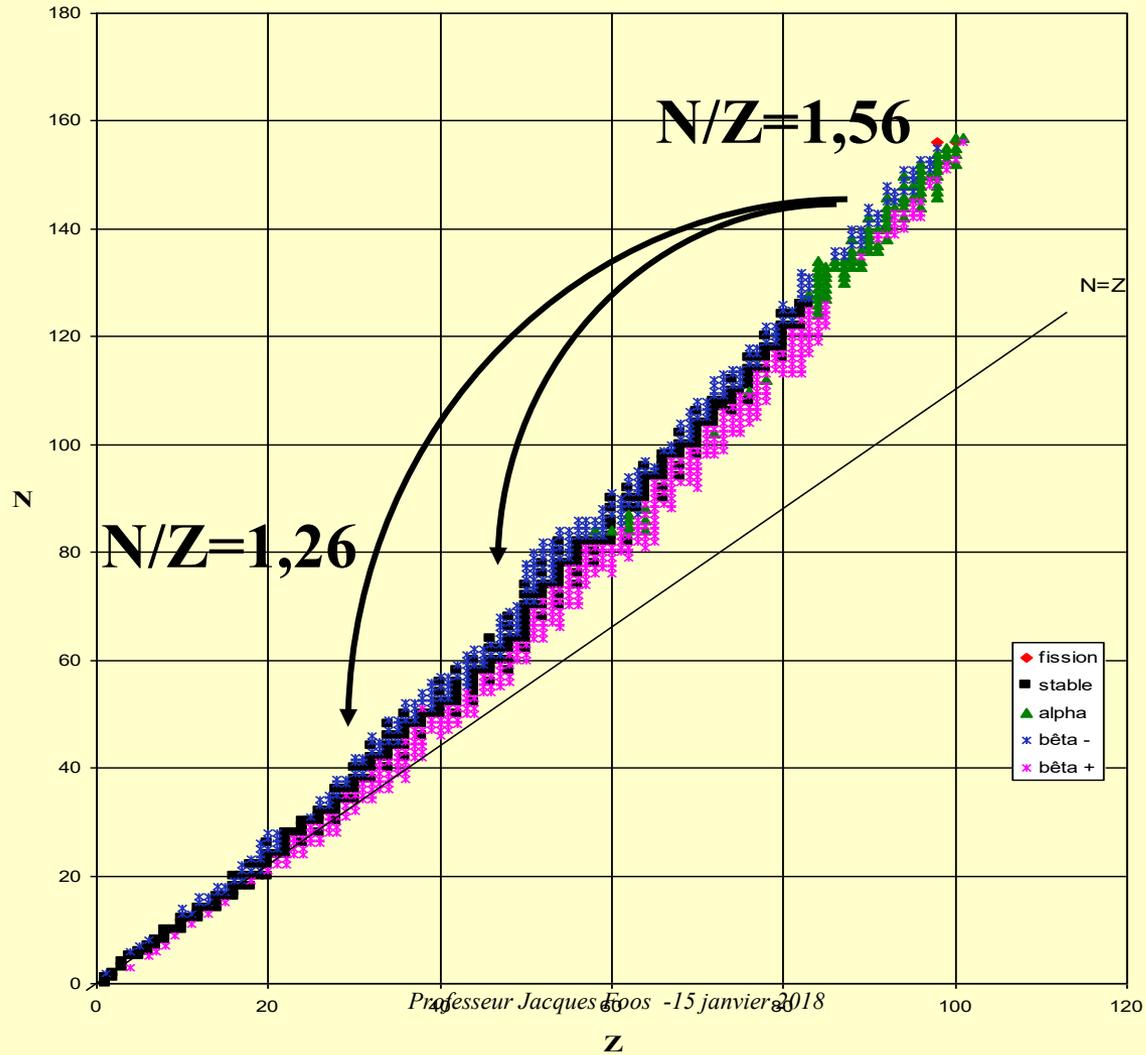
**Bien que ce ne soit qu'une hypothèse, ses conséquences, c'est-à-dire la production d'une réaction en chaîne, paraissent évidentes.**

# Les neutrons

**En fait, dès qu'on a accepté le principe que des noyaux d'uranium peuvent se casser en deux noyaux plus petits, on en conclut deux choses :**

- **Ces noyaux résultants sont très excédentaires en neutrons donc émetteurs  $\beta^-$  (le rapport N/Z de l'uranium est de 1,56 alors que le rapport N/Z des noyaux stables autour de Z=46 est de 1,26).**

# Les neutrons



# Les neutrons

**En fait, dès qu'on a accepté le principe que des noyaux d'uranium peuvent se casser en deux noyaux plus petits, on en conclut deux choses :**

- **Ces noyaux résultants sont très excédentaires en neutrons donc émetteurs  $\beta^-$  (le rapport N/Z de l'uranium est de 1,56 alors que le rapport N/Z des noyaux stables autour de Z=46 est de 1,26).**
- **Si on est dans un milieu « ralentisseur de neutrons » pour que l'absorption de ces derniers par un noyau soit possible (au lieu de rebondir sur le noyau s'il est trop rapide), la réaction en chaîne va se produire et libérer très rapidement une grande quantité d'énergie : une bombe est alors réalisable !**

**Or, tous ces raisonnements font partie des discussions entre physiciens lors de cette conférence et les journalistes y voient le « scoop » de l'année !!**

**Le 28 janvier 1939, le New York Times titrait déjà :  
« Une explosion atomique libère 200 000 000 volts »**

**Or, tous ces raisonnements font partie des discussions entre physiciens lors de cette conférence et les journalistes y voient le « scoop » de l'année !!**

**Le 28 janvier 1939, le New York Times titrait déjà :  
« Une explosion atomique libère 200 000 000 volts »**

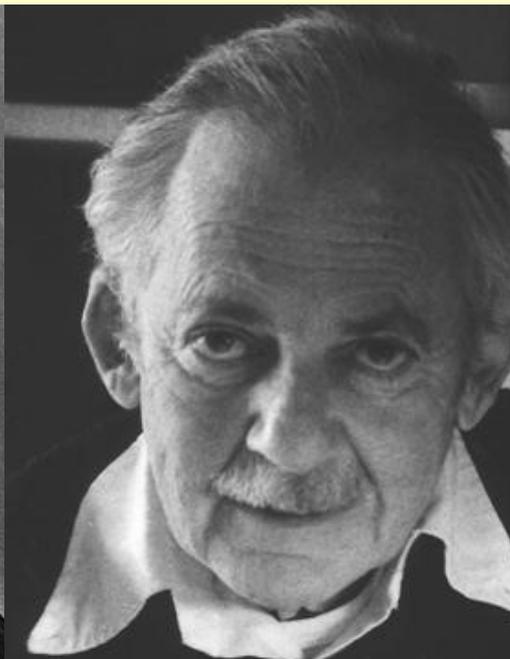
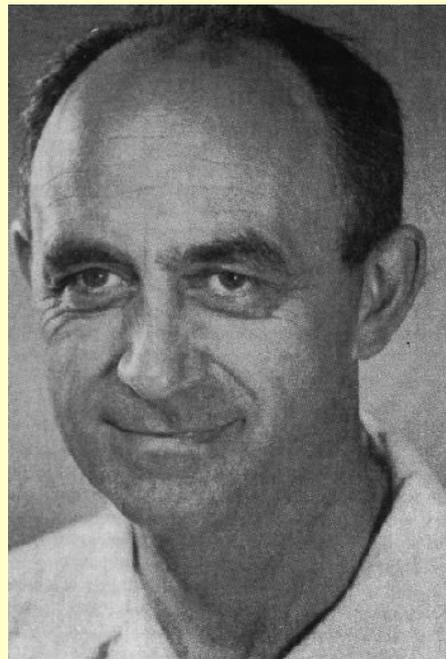
**Ainsi, la première fois que des journalistes parlent de cette découverte, c'est pour titrer sur la possibilité de construire une bombe alors que la première manifestation de cette énergie sera obtenue dans une pile, ancêtre de nos réacteurs actuels :**

**« la pile de Fermi », le 2 décembre 1942**

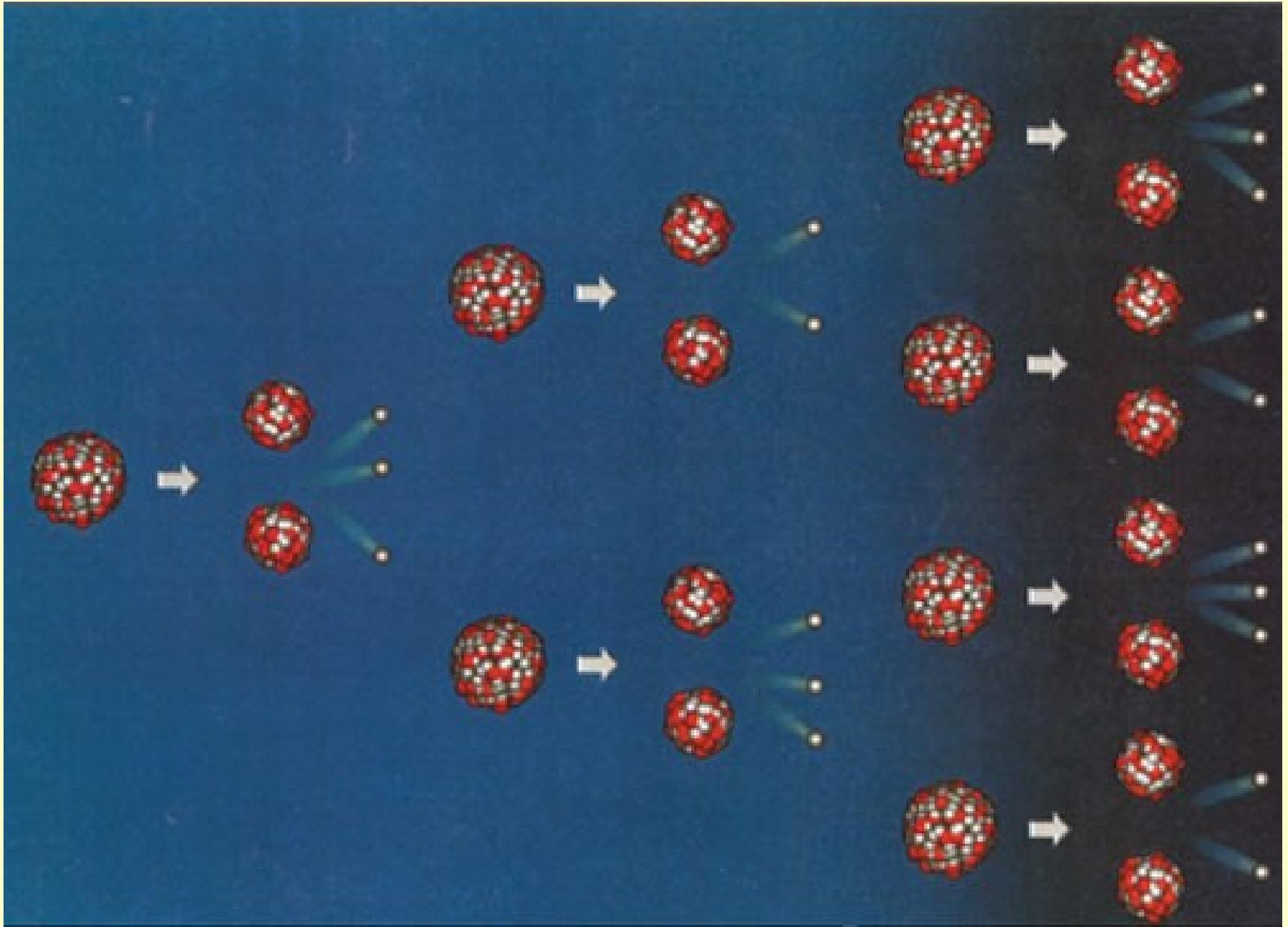
# La découverte des neutrons permet d'envisager de récupérer cette énergie

Dès le début de l'année 1939, Enrico Fermi, Léo Szilard, Herbert-Lawrence Anderson et Frédéric Joliot-Curie mettent en évidence le processus de la réaction en chaîne. *Cette hypothèse est donc vérifiée.*

Très vite, le nombre de neutrons éjectés à chaque fission est déterminé expérimentalement : entre 2 et 3,5.



# La réaction en chaîne

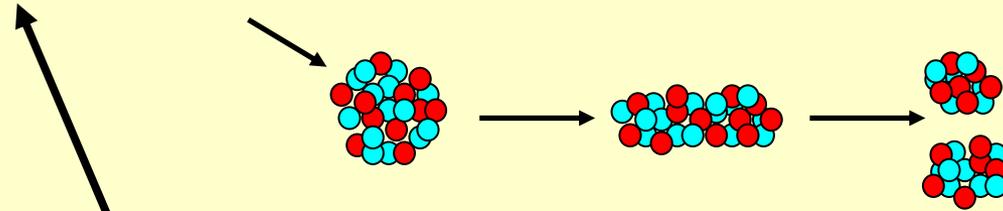


Niels Bohr va mettre à profit son semestre à Princeton pour montrer, avec l'aide de J. Wheeler, que des deux isotopes de l'uranium, l'un bien connu, le « 238 », l'autre, découvert seulement en 1935, le « 235 », c'est ce dernier qui subit la fission par un neutron lent. Or, cet isotope de l'uranium n'est présent qu'à 0,72% dans l'uranium !



# Un problème apparaît très vite, qui semble insurmontable pour maîtriser véritablement la réaction

1 neutron lent



fragments de fission  
+ des neutrons rapides  
(2,5 en moyenne)

-1,5

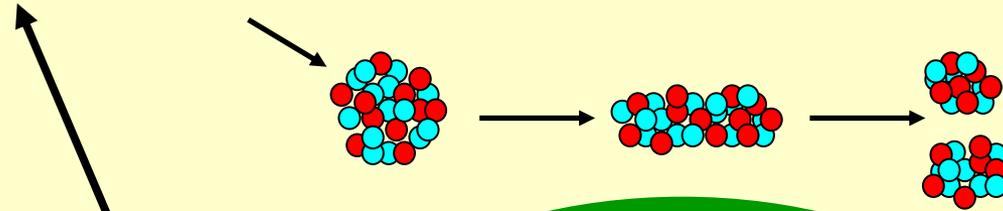
modérateur

2,5 neutrons lents

absorbeur de neutrons

# Or, un problème apparaît très vite, qui semble insurmontable pour maîtriser véritablement la réaction

1 neutron lent



fragments de fission  
+ des neutrons rapides  
(2,5 en moyenne)

-1,5

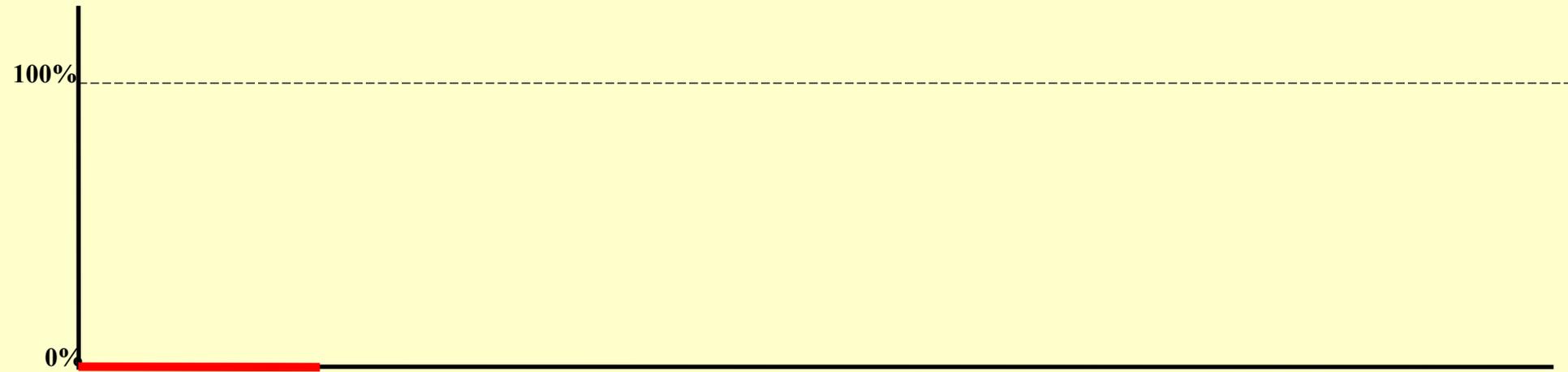
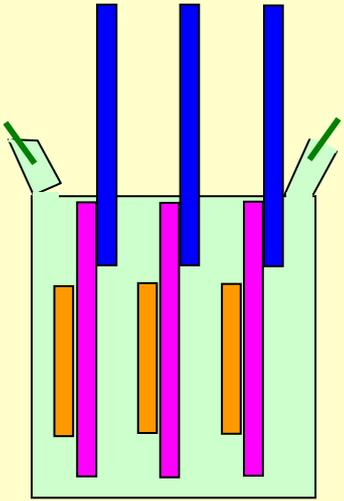
Ce cycle dure  
1/40 000<sup>e</sup> de  
seconde !

modérateur

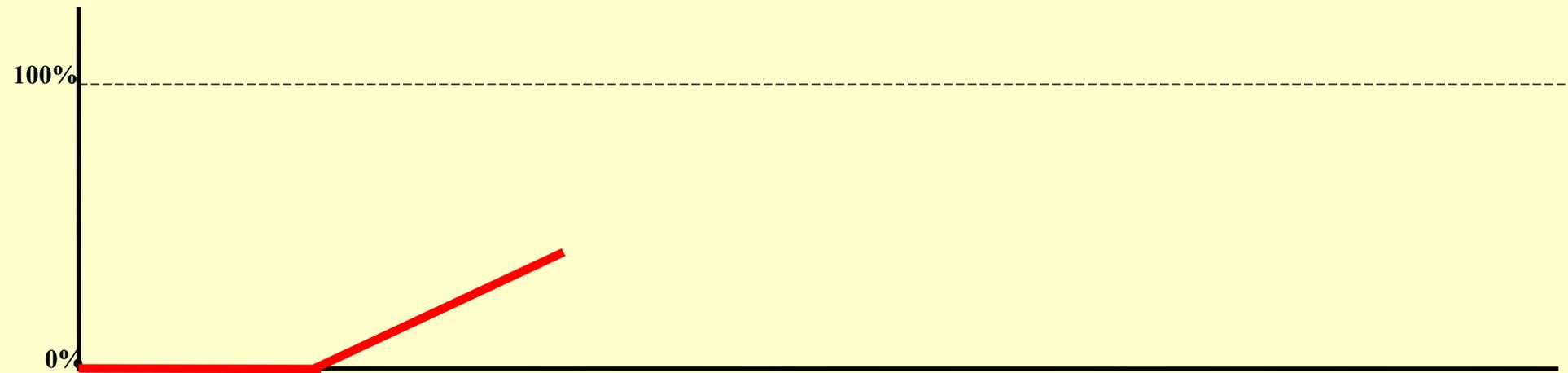
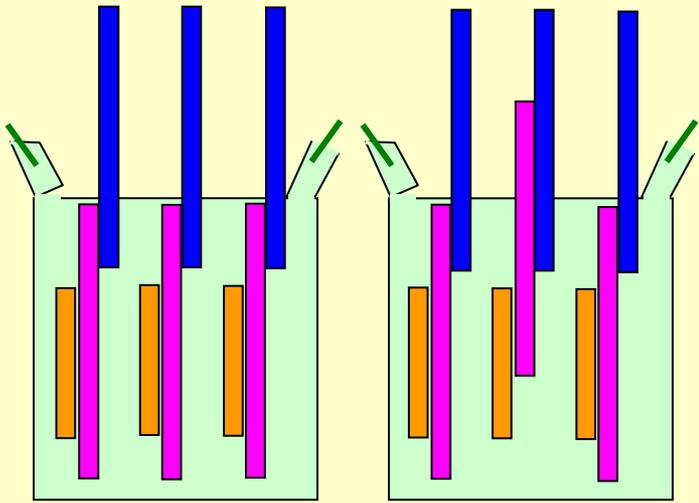
2,5 neutrons lents

absorbeur de  
neutrons

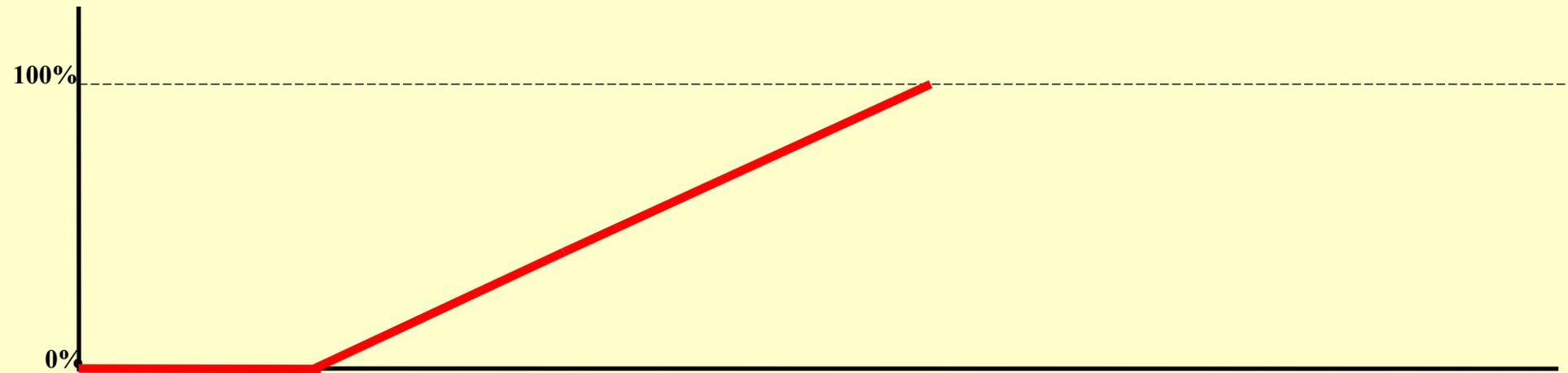
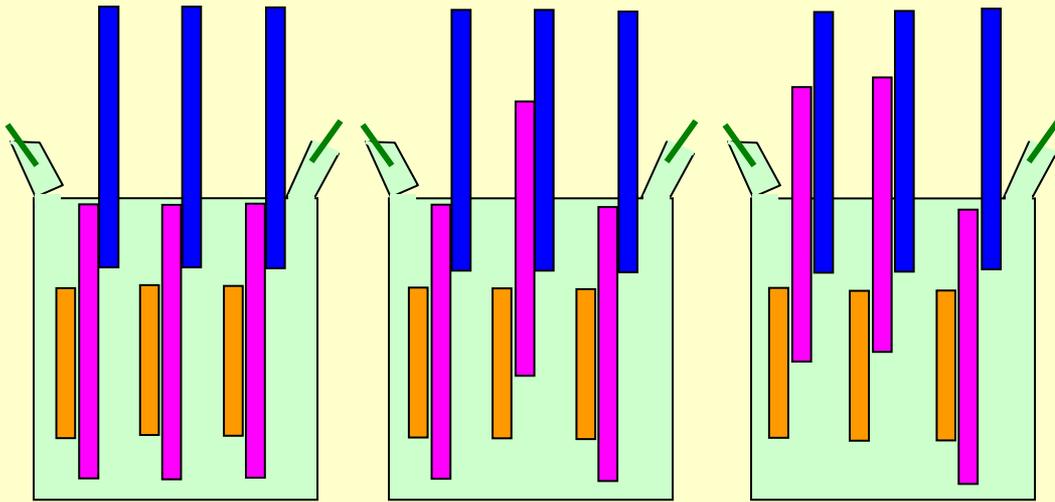
# Schéma de pilotage



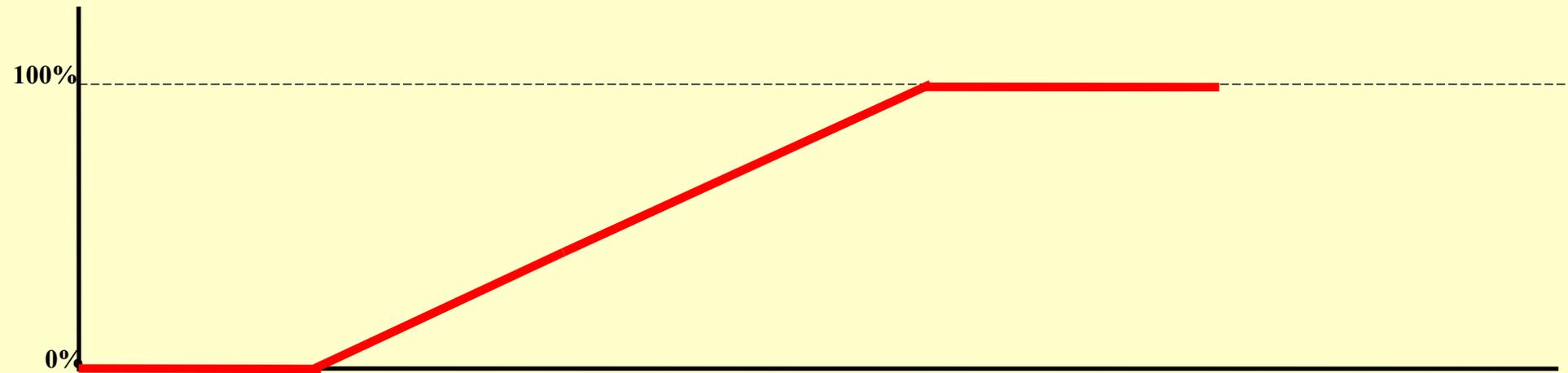
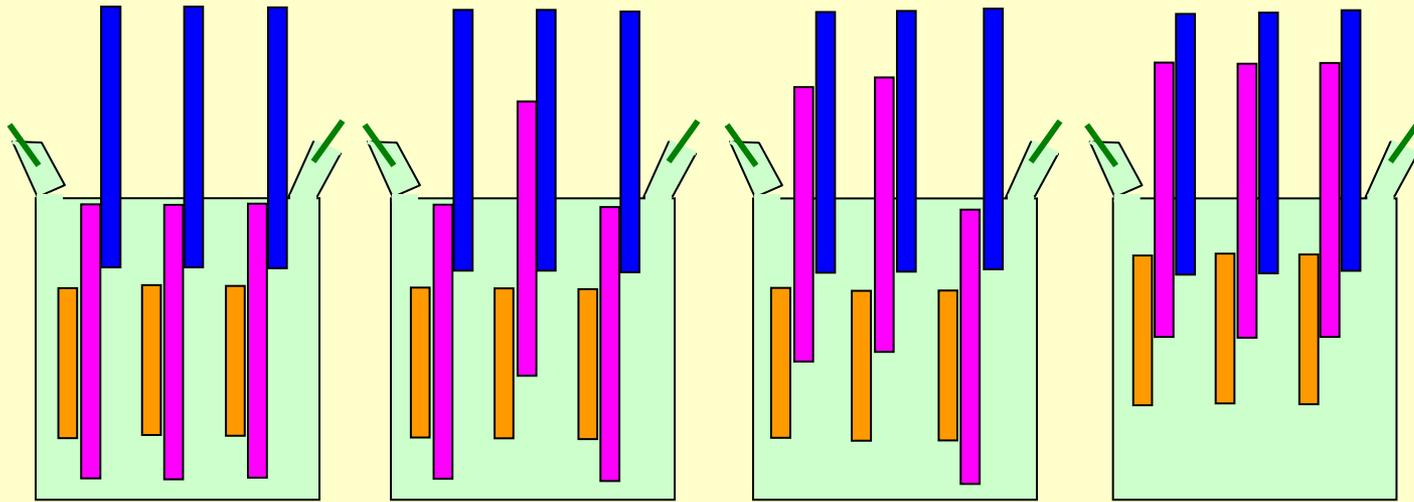
# Schéma de pilotage



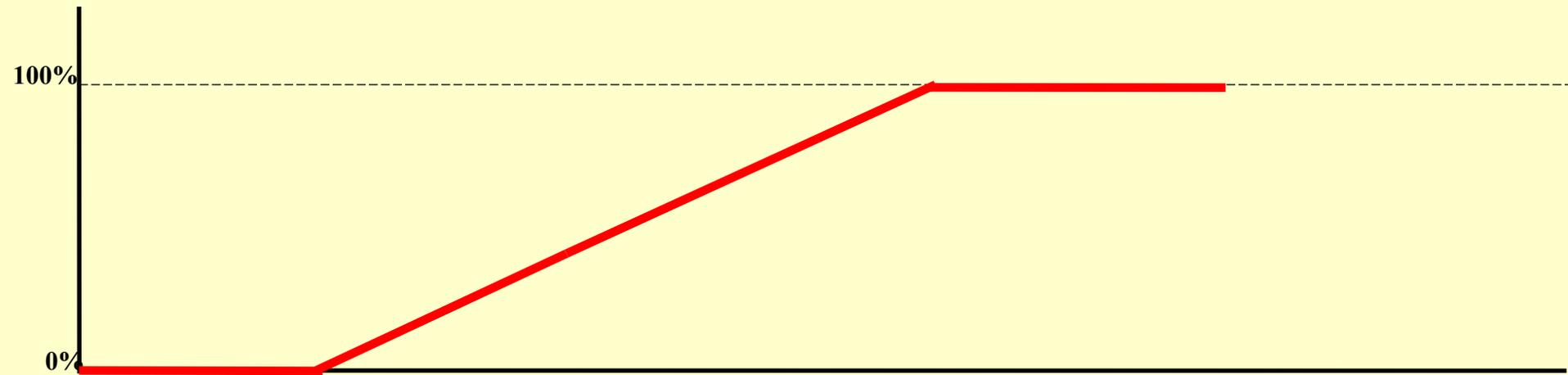
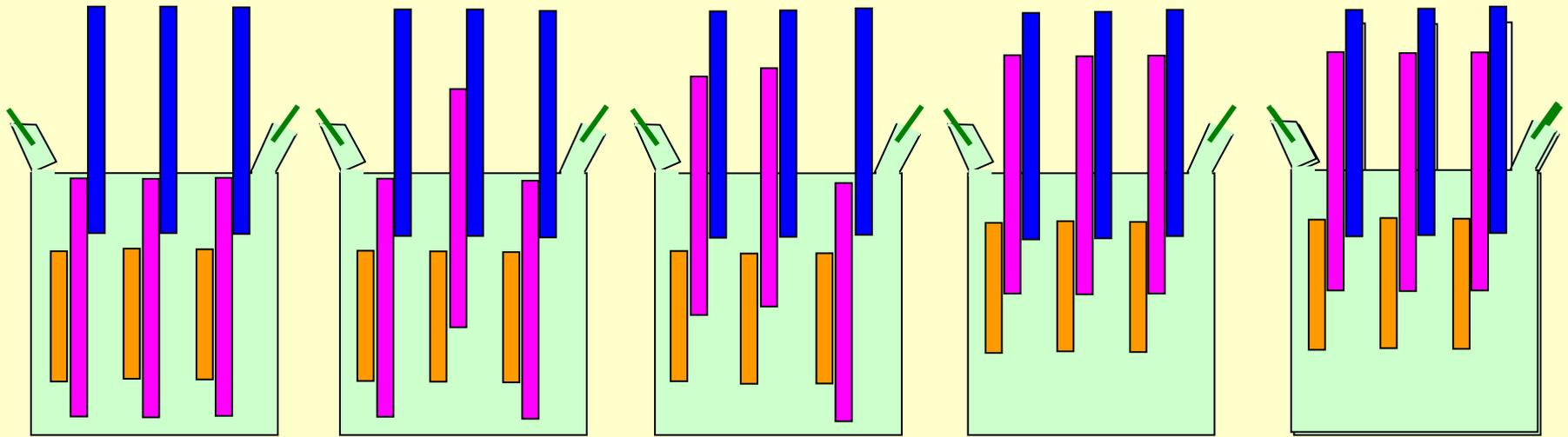
# Schéma de pilotage



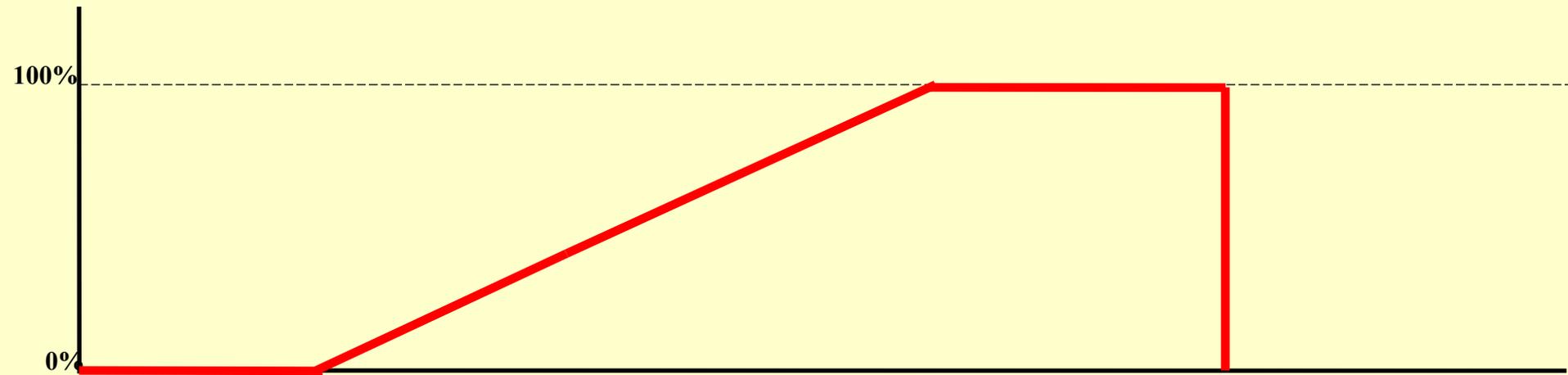
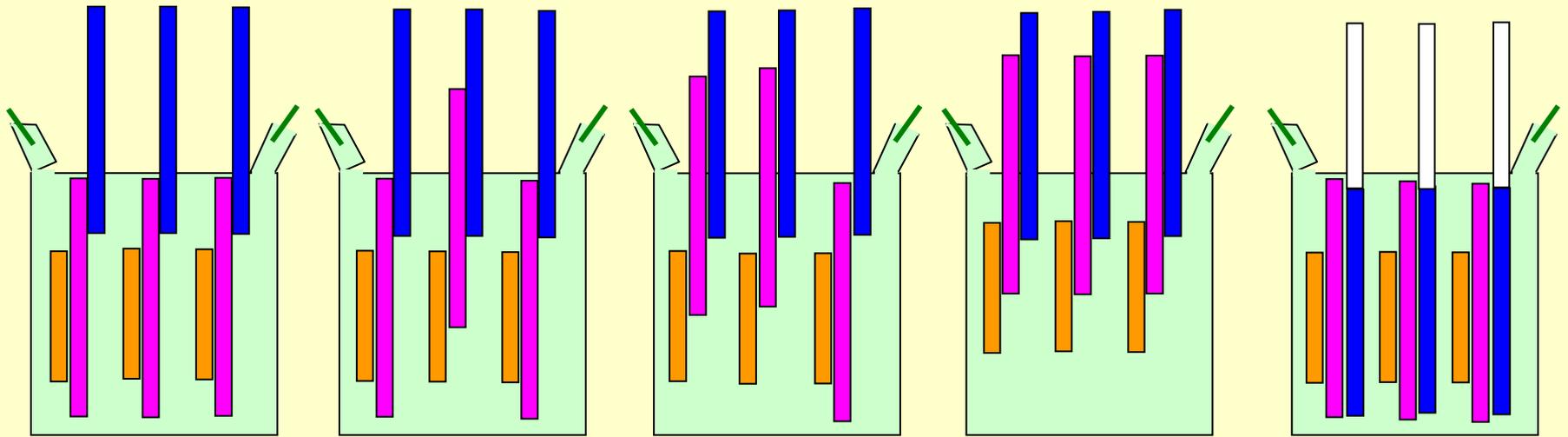
# Schéma de pilotage



# Schéma de pilotage



# Schéma de pilotage

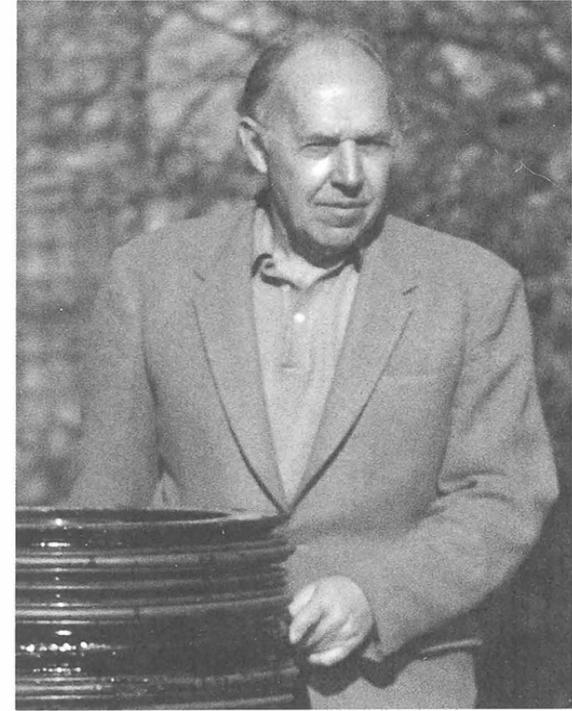




# La découverte des neutrons retardés va changer la donne !

En avril 1939, Richard Brooke Roberts (Carnegie Institute de Washington) publie un article qui évoque la possibilité que posséderaient les noyaux très excédentaires en neutrons de voir certains s'échapper du noyau lors de leur désintégration  $\beta^-$ .

Cette hypothèse sera confirmée fin 1939. Ces neutrons ne représentent que 0,65% de la population neutronique mais leur « durée de vie » est de l'ordre de la seconde (entre quelques dixièmes et quelques dizaines de secondes).



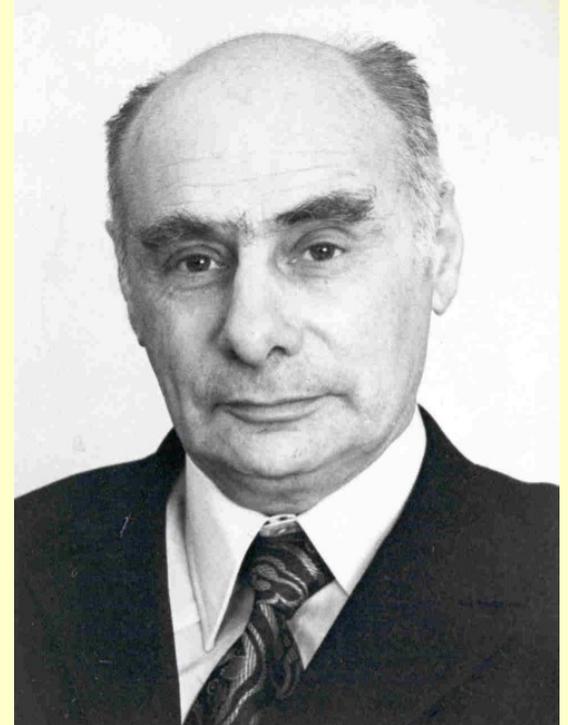
*Richard Brooke Roberts*

**Le pilotage d'un réacteur nucléaire devient possible !**

# La découverte de la fission spontanée

En fait, la fission de très gros noyaux est un phénomène de désintégration qui sera découvert en 1940, par Georges Flérov sur l'uranium-238.

C'est donc un processus naturel mais qui est très marginal puisqu'il ne concerne qu'un noyau sur 2 000 000 pour l'uranium-238.





## Le première manifestation de l'énergie de fission : la pile de Fermi

## Tous les acteurs sont en place !

**Ce nouveau phénomène de fission concerne l'isotope-235 de l'uranium, qui n'est présent qu'à 0,72% dans ce métal.**

**Comme il n'est pas question à ce moment d'envisager d'enrichir l'uranium en cet isotope, du moins en quantités importantes, il va donc falloir de grandes quantités d'uranium.**

**Il faut un ralentisseur de neutrons. Le plus facile à utiliser en grandes quantités est le graphite. Il doit être très pur pour éviter d'induire dans les impuretés des réactions d'activation.**

## **Tous les acteurs sont en place !**

**Il faut aussi introduire dans ces matériaux des barres d'un élément susceptible d'absorber les neutrons en excès. On connaît déjà à cette époque et depuis un certain temps les propriétés neutrophages du bore et du cadmium.**

**Enfin, le pilotage sera résolu grâce aux neutrons retardés.**

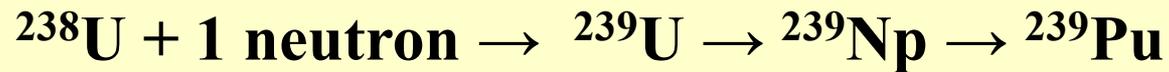
**Les premières expériences et « protopiles » vont avoir lieu à l'Université de Columbia à New York.**

**Mais les découvertes, en 1940, des deux éléments suivant l'uranium vont encore modifier la donne et Fermi va devoir en tenir compte dans ses calculs.**

## 27 mai 1940 : découverte du neptunium (élément 93)

**Edwin McMillan et Philip Abelson vont obtenir l'élément 93 en bombardant de l'uranium-238 (*et seulement cet isotope*) avec des neutrons au Berkeley Radiation Laboratory (Université de Californie).**

**L'absorption d'un neutron par le noyau d'uranium-238 donne de l'uranium-239 qui se désintègre par  $\beta^-$  en neptunium-239 ( $T = 2,4$  jours) qui lui-même se désintégrera en plutonium-239 également par  $\beta^-$  qui, lui, est beaucoup plus stable ( $T = 24\ 000$  ans) :**



# 27 mai 1940 : découverte du neptunium (élément 93)



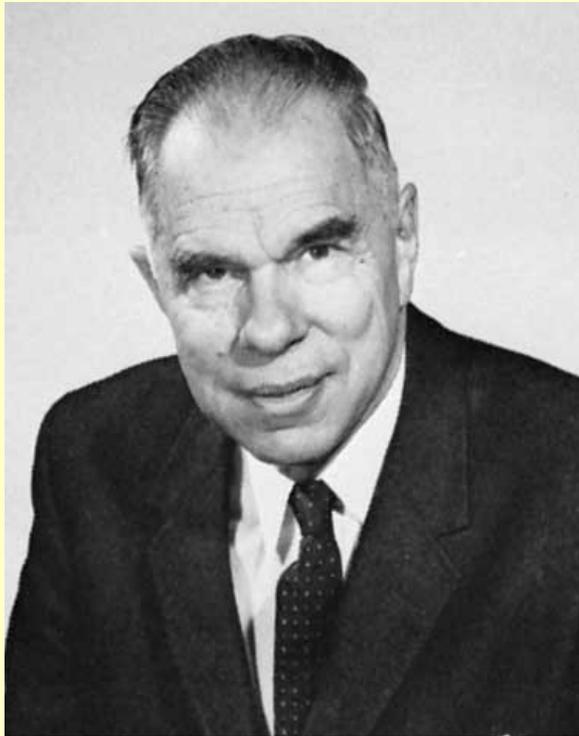
*Edwin McMillan*

**E. McMillan et Ph. Abelson n'étudient que le neptunium et ne trouvent pas de traces de fission à partir de cet élément.**

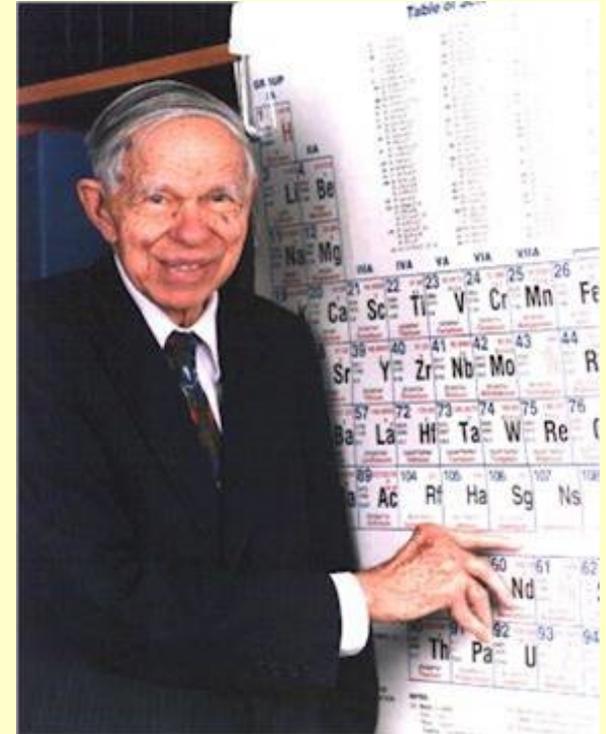


*Philip Abelson*

# 14 décembre 1940 : découverte du plutonium (élément 94)



L'isotope  $^{238}$  du plutonium a été produit en utilisant cette fois un cyclotron par Glenn T. Seaborg et son équipe.



En bombardant de l'uranium-238 avec des noyaux de deutérium ( $^2\text{H}$ ), on obtient du neptunium-238 et 2 neutrons. Le  $^{238}\text{Np}$  se désintègre alors très rapidement en plutonium-238 par  $\beta^-$ .

# 14 décembre 1940 : découverte du plutonium (élément 94)

**Très vite, on montre que les isotopes impairs du plutonium peuvent subir la fission par bombardement neutronique.**

**On montrera un peu plus tard, toujours en utilisant le modèle du noyau dit « de la goutte liquide », que seuls les isotopes « pair-pair » fissionnent.**

**Ainsi l'uranium-235 (élément 92) devient uranium-236 sous l'impact d'un neutron et le plutonium-239 (élément 94) devient plutonium-240 sous l'impact d'un neutron.**

## 14 décembre 1940 : découverte du plutonium (élément 94)

**Or, McMillan et Abelson ont obtenu du neptunium en bombardant de l'uranium-238 avec des neutrons.**

**L'absorption d'un neutron par le noyau d'uranium-238 donne de l'uranium-239 qui se désintègre par  $\beta^-$  en neptunium-239 qui lui-même se désintégrera en plutonium-239 également par  $\beta^-$**

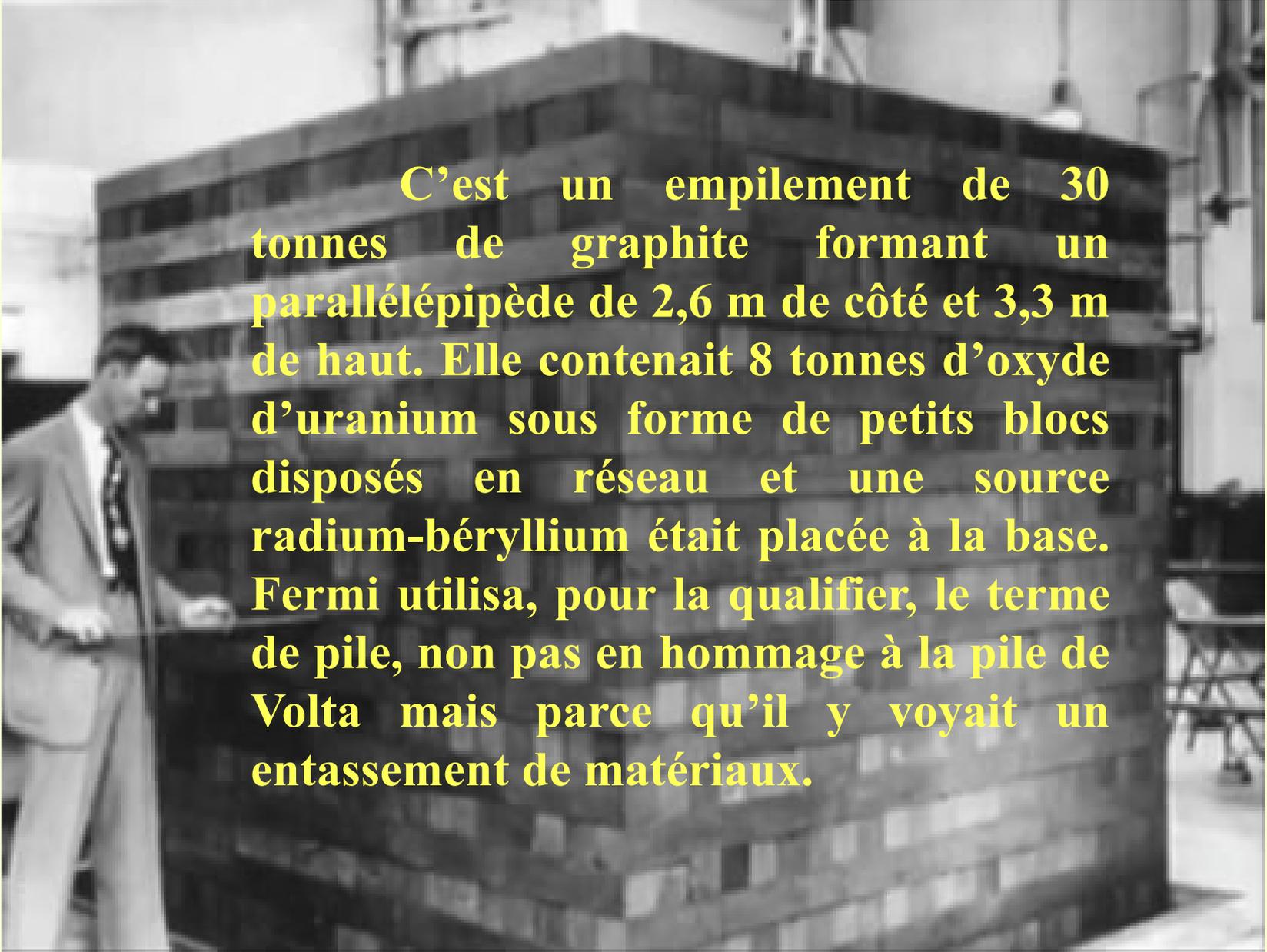


**Ainsi, l'uranium-238, par capture d'un neutron ne fissionne pas mais produit du plutonium-239 qui, lui, est fissile.**

***(on dira plus tard que l'uranium-238 est fertile)***

## Août 1941 : la première pile sous-critique à Columbia

C'est un empilement de 30 tonnes de graphite formant un parallélépipède de 2,6 m de côté et 3,3 m de haut. Elle contenait 8 tonnes d'oxyde d'uranium sous forme de petits blocs disposés en réseau et une source radium-béryllium était placée à la base. Fermi utilisa, pour la qualifier, le terme de pile, non pas en hommage à la pile de Volta mais parce qu'il y voyait un entassement de matériaux.



# Premières piles sous-critiques à Columbia

La première pile fut terminée en septembre 1941, et lui donna un facteur de multiplication neutronique  $k_{\infty} = 0,83$ .

La seconde pile à l'automne 1941 monta à  $k_{\infty} = 0,87$ . Pour que la réaction en chaîne soit entretenue, quelle que soit la taille du réacteur, et il fallait progresser sur trois fronts :

- 1 - optimiser la répartition de l'uranium et du graphite ;
- 2 -remplacer l'oxyde d'uranium par de l'uranium métallique ;
- 3 -purifier les ingrédients pour éliminer les pièges à neutrons comme le bore.

## Fermi s'installe à Chicago

Jusqu'à fin 1942, Fermi y réalisa quelque 31 expériences.

Il perfectionna à cette occasion la formule qui donne le facteur  $k_{\infty}$  de multiplication neutronique (le rapport entre le nombre de neutrons entre une génération et la suivante pour une pile sans fuites de neutrons) Elle s'écrit sous la forme d'un produit de 4 coefficients

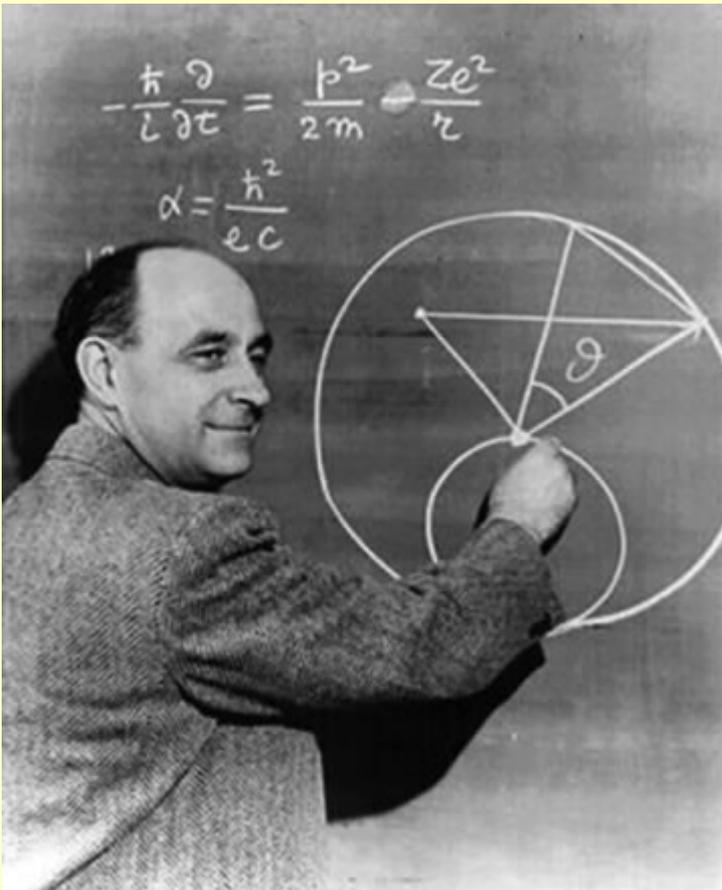
# Formule dite « des quatre facteurs »

$$k_{\infty} =$$



$\varepsilon$   $\rho$   $f$   $\eta$

En février 1942, après leur déménagement de Columbia à Chicago, Fermi et son équipe entreprennent l'édification d'une nouvelle «pile», dite intermédiaire car elle ne devait pas encore atteindre la taille critique, sur le campus de l'université.



**Problème ennuyeux** : depuis la déclaration de guerre de l'Italie aux États-Unis, le 11 décembre 1941, Fermi se retrouve avec le statut de ressortissant d'une puissance ennemie : sa liberté de mouvement est alors fortement limité et son courrier est ouvert par la censure !

# Où installer cette pile à Chicago ?

**Il faut trouver un endroit assez grand pour rassembler le matériel et construire ces appareillages. Fermi jette son dévolu sur un cours de squash, installé sous les tribunes d'un stade de football de l'université, Staggs Field.**

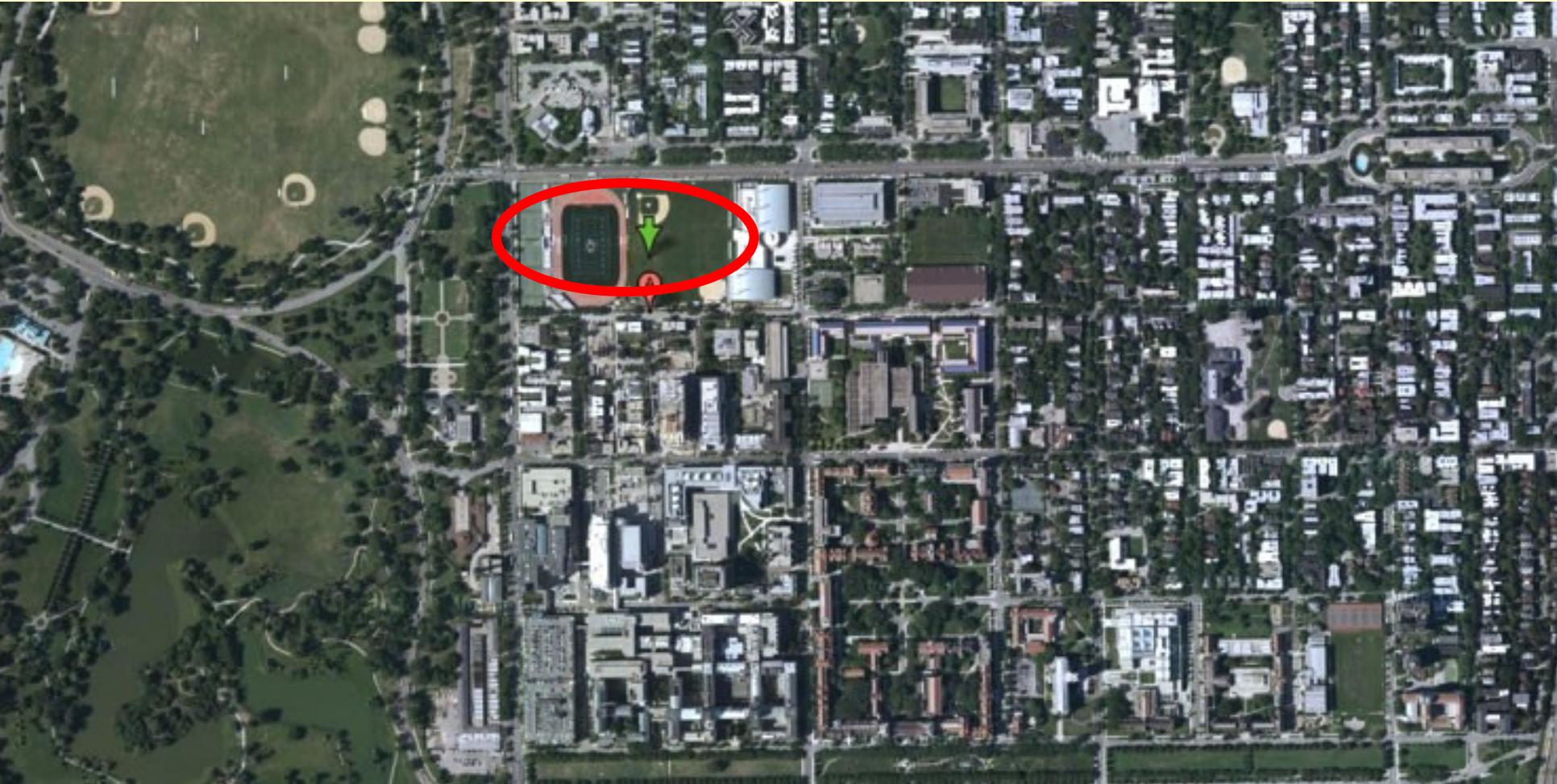
**L'endroit peut s'y prêter dans la mesure où la réaction doit rester sous-critique : il ne s'agit que d'affiner la valeur des paramètres qui permettront le pilotage de la première pile « atomique ».**

En effet, après des saisons de plus en plus catastrophiques, culminant par des défaites cuisantes (0-47 face à l'université de Virginie, 0-61 face à l'université d'État de l'Ohio, 0-61 face à Harvard et 0-89 face à l'université du Michigan), l'université de Chicago avait supprimé son équipe de football américain.

Le stade était désaffecté depuis 1939



**Mais l'endroit est loin d'être isolé !**

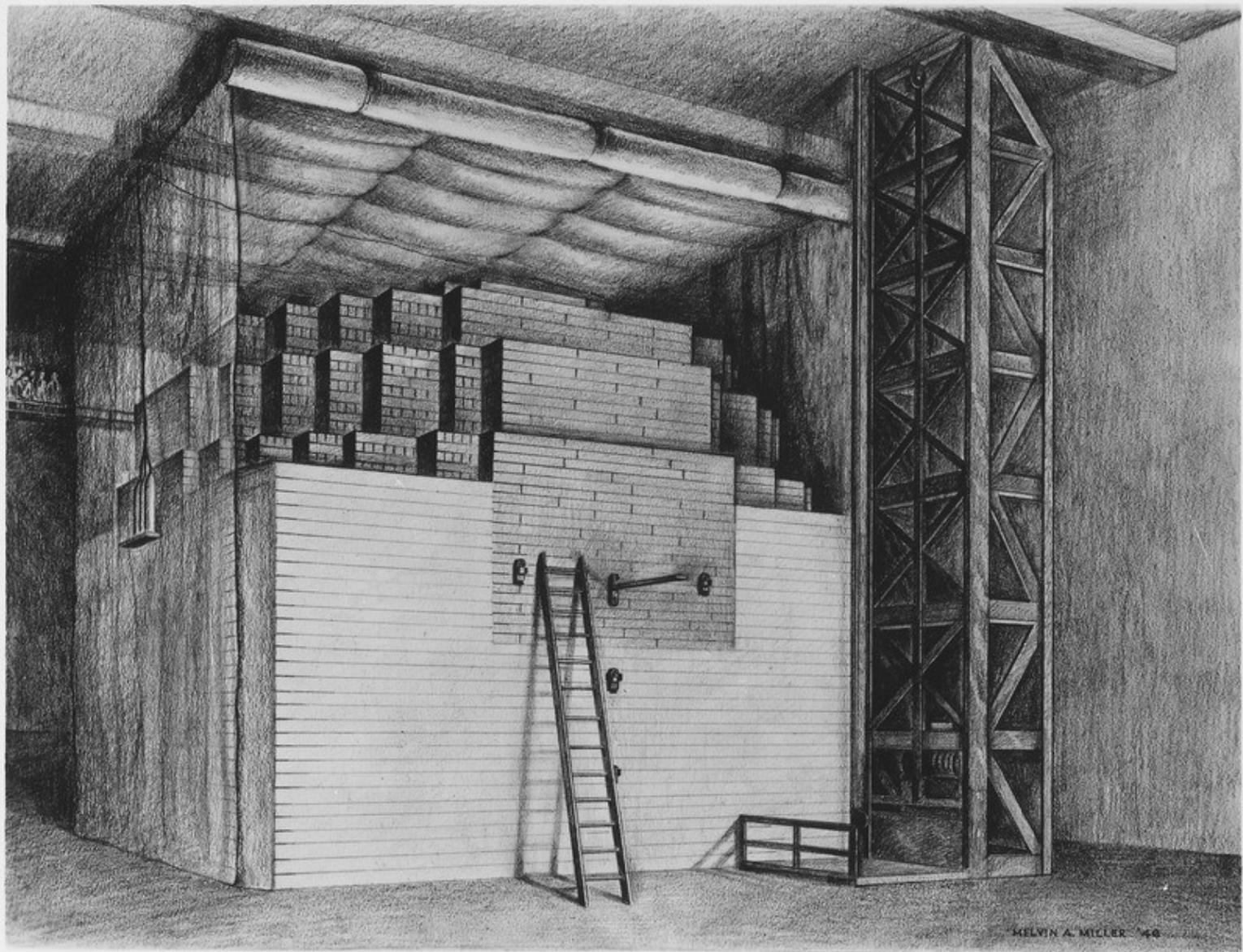


**Mais l'endroit est loin d'être isolé !**

**La pile qui devra véritablement  
montrer l'efficacité de la réaction en  
chaîne ( $k_{\infty} > 1$ ) sera, elle, installée dans  
un nouveau bâtiment construit dans la  
forêt d'Argonne, à une quarantaine de  
kilomètres au sud-ouest de Chicago.**

***La population peut respirer !***

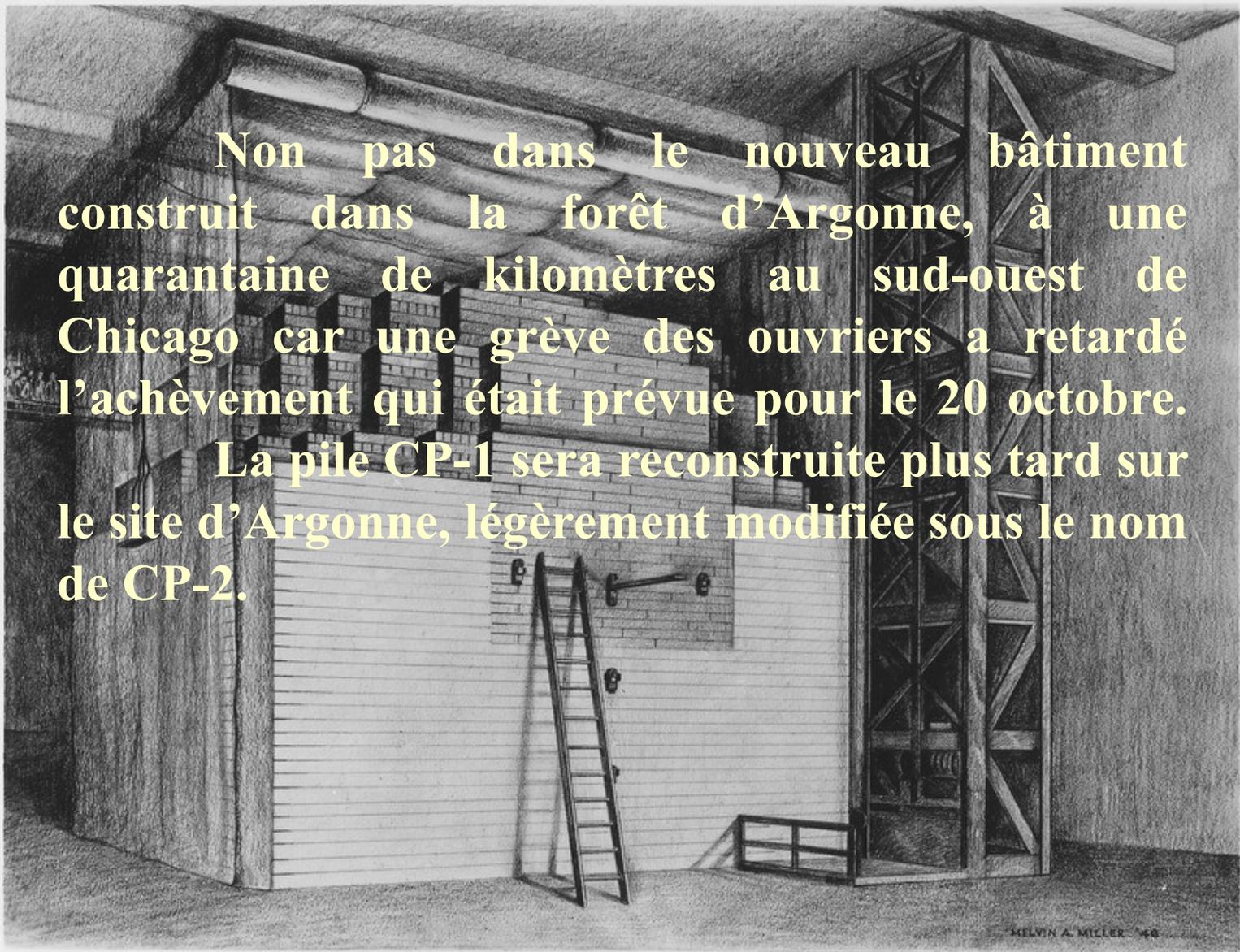
# Fermi entreprend la construction de CP1 (Chicago Pile One)



# Fermi entreprend la construction de CP1 (Chicago Pile One)

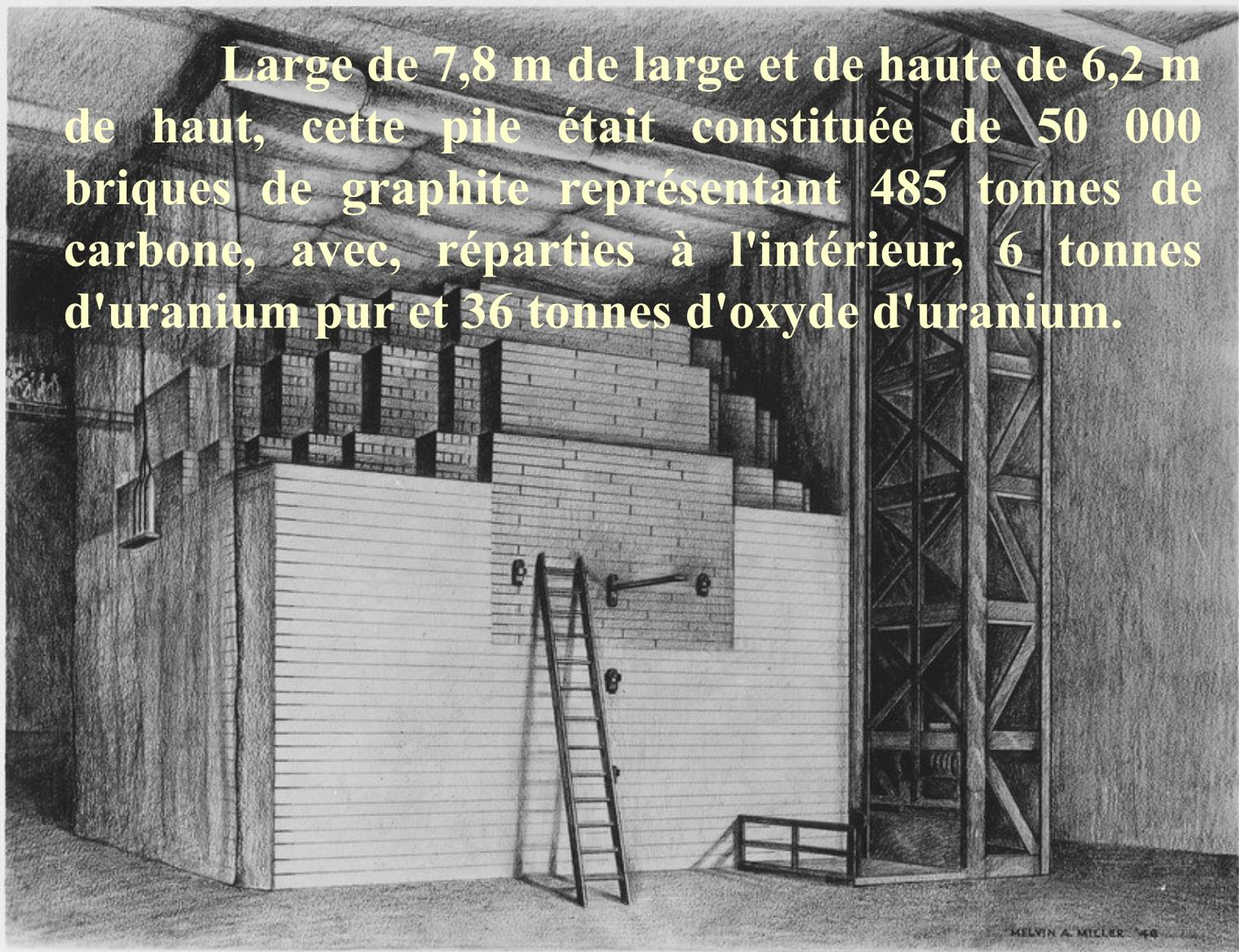
Non pas dans le nouveau bâtiment construit dans la forêt d'Argonne, à une quarantaine de kilomètres au sud-ouest de Chicago car une grève des ouvriers a retardé l'achèvement qui était prévue pour le 20 octobre.

La pile CP-1 sera reconstruite plus tard sur le site d'Argonne, légèrement modifiée sous le nom de CP-2.



# Fermi entreprend la construction de CP1 (Chicago Pile One)

Large de 7,8 m de large et de haute de 6,2 m de haut, cette pile était constituée de 50 000 briques de graphite représentant 485 tonnes de carbone, avec, réparties à l'intérieur, 6 tonnes d'uranium pur et 36 tonnes d'oxyde d'uranium.





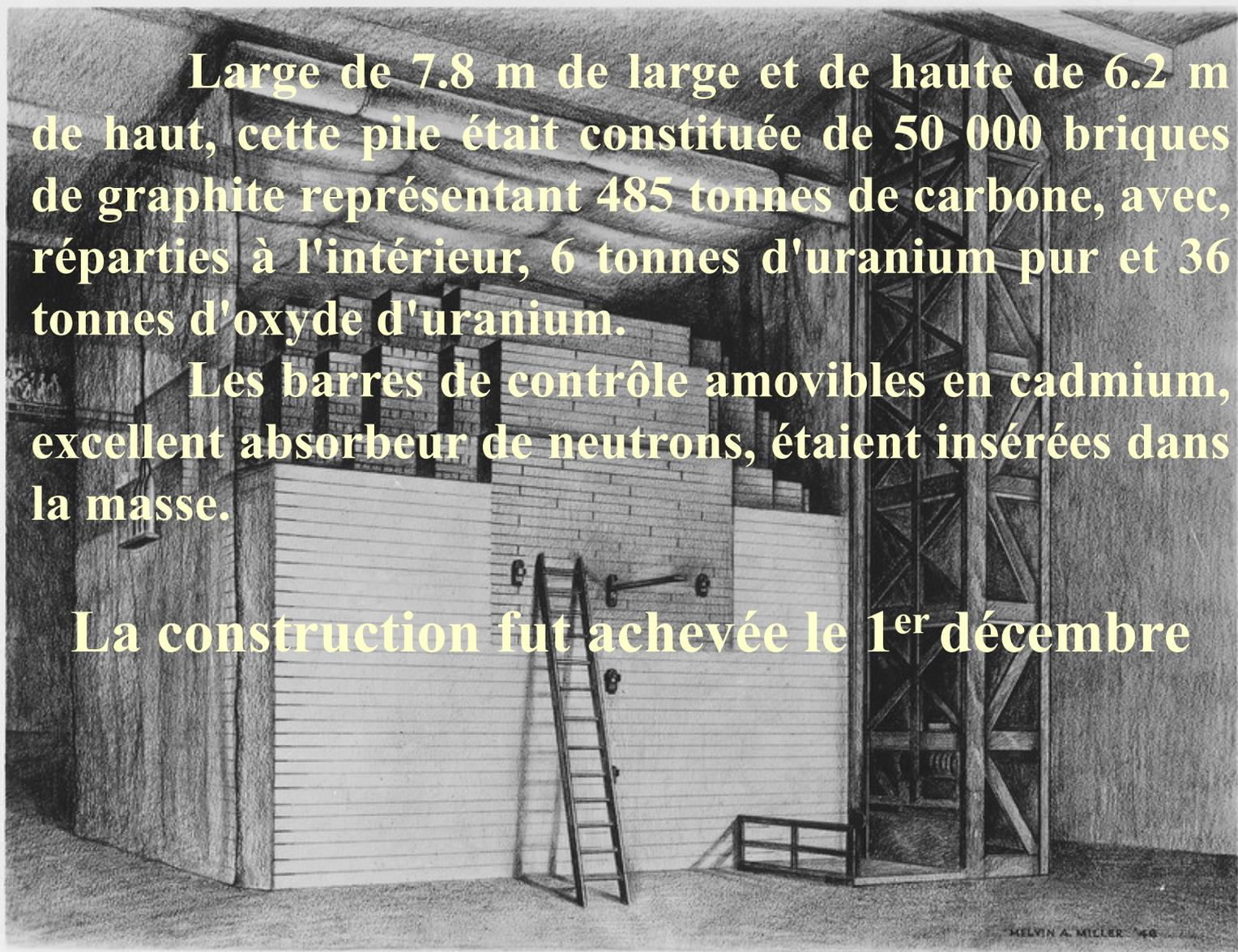
**Fermi avait calculé  
qu'avec cette masse de  
graphite, on aurait pu  
offrir un crayon à  
chaque habitant de la  
Terre !**

# Fermi entreprend la construction de CP1 (Chicago Pile One)

Large de 7.8 m de large et de haute de 6.2 m de haut, cette pile était constituée de 50 000 briques de graphite représentant 485 tonnes de carbone, avec, réparties à l'intérieur, 6 tonnes d'uranium pur et 36 tonnes d'oxyde d'uranium.

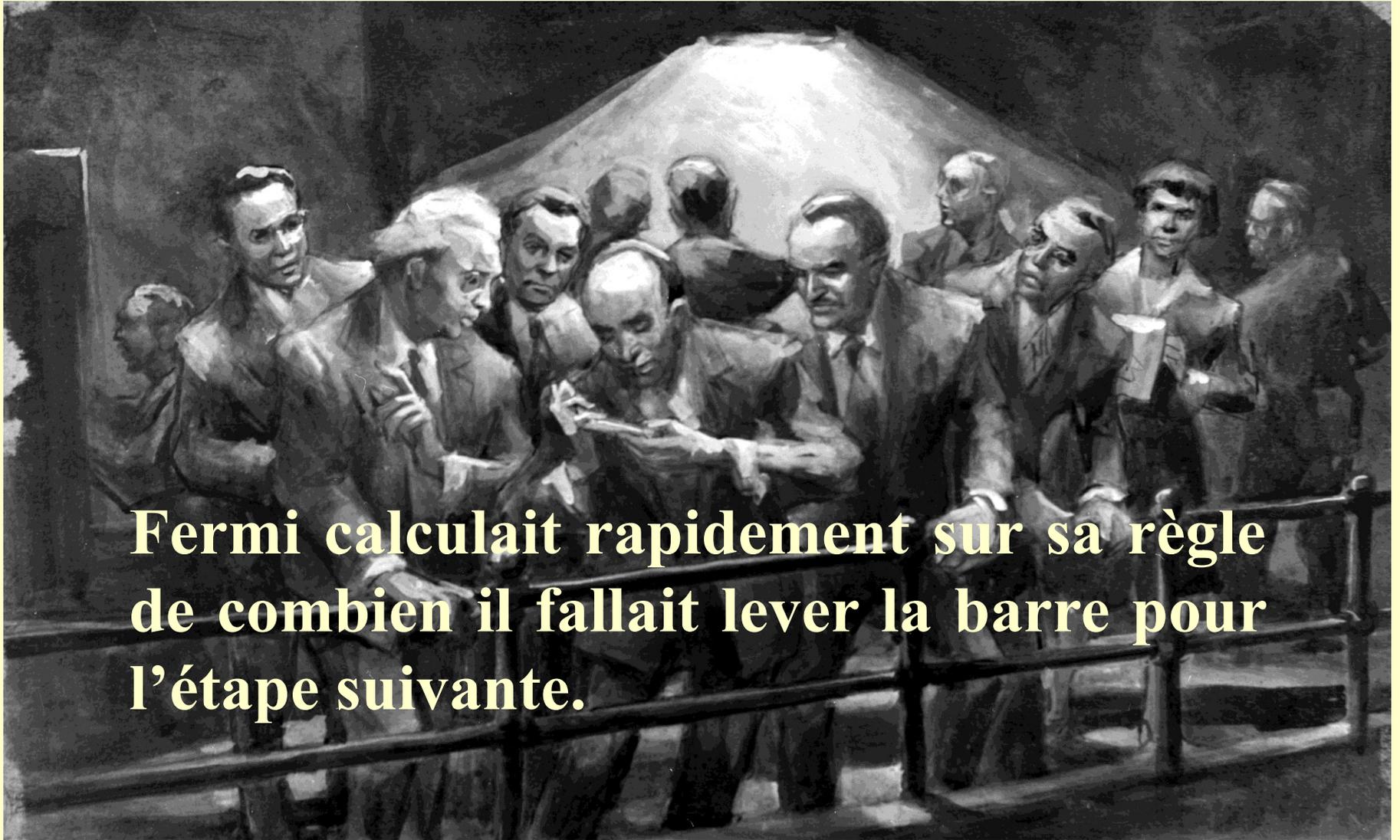
Les barres de contrôle amovibles en cadmium, excellent absorbeur de neutrons, étaient insérées dans la masse.

La construction fut achevée le 1<sup>er</sup> décembre

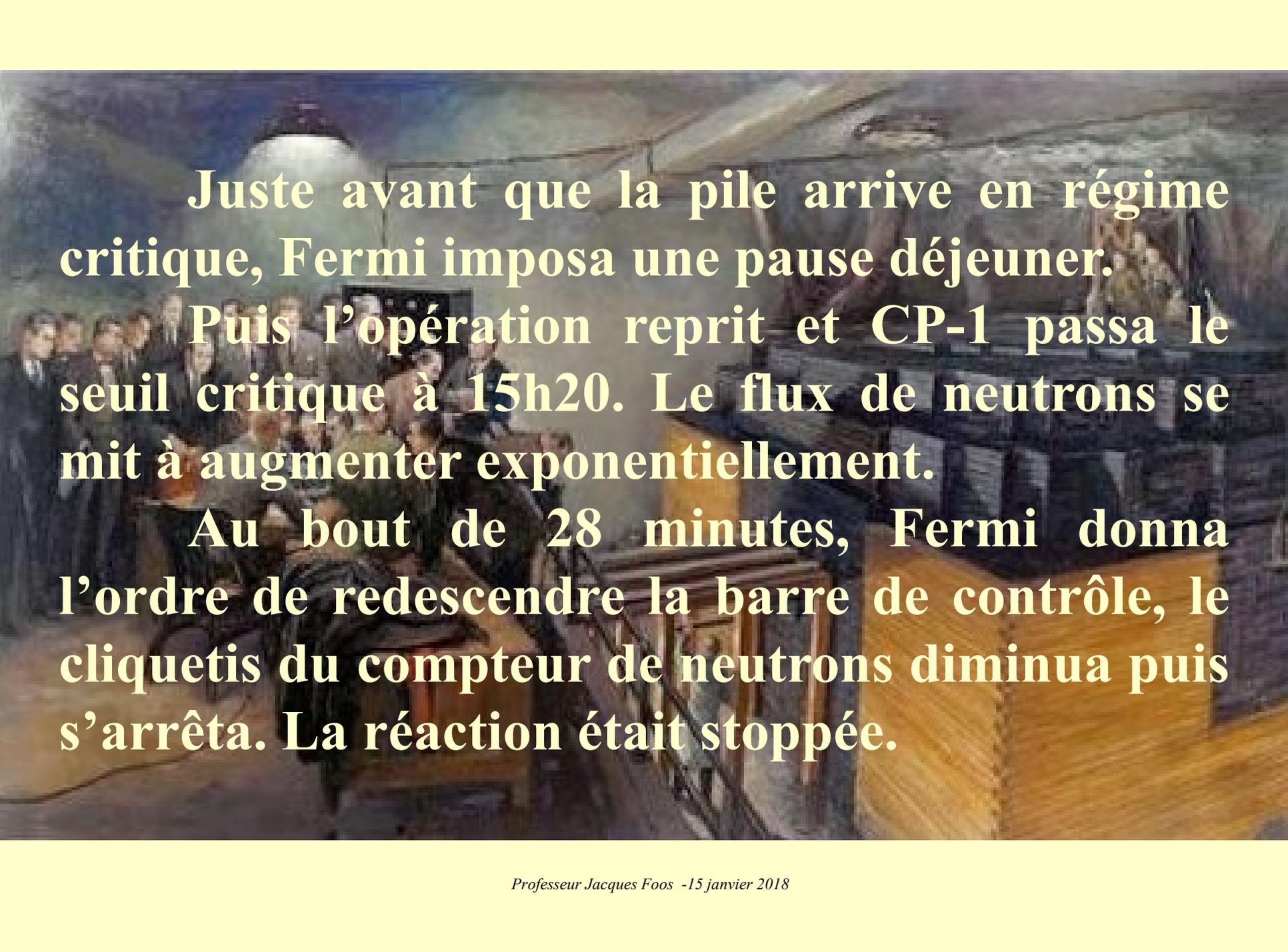


Et le 2 décembre 1942





**Fermi calculait rapidement sur sa règle de combien il fallait lever la barre pour l'étape suivante.**



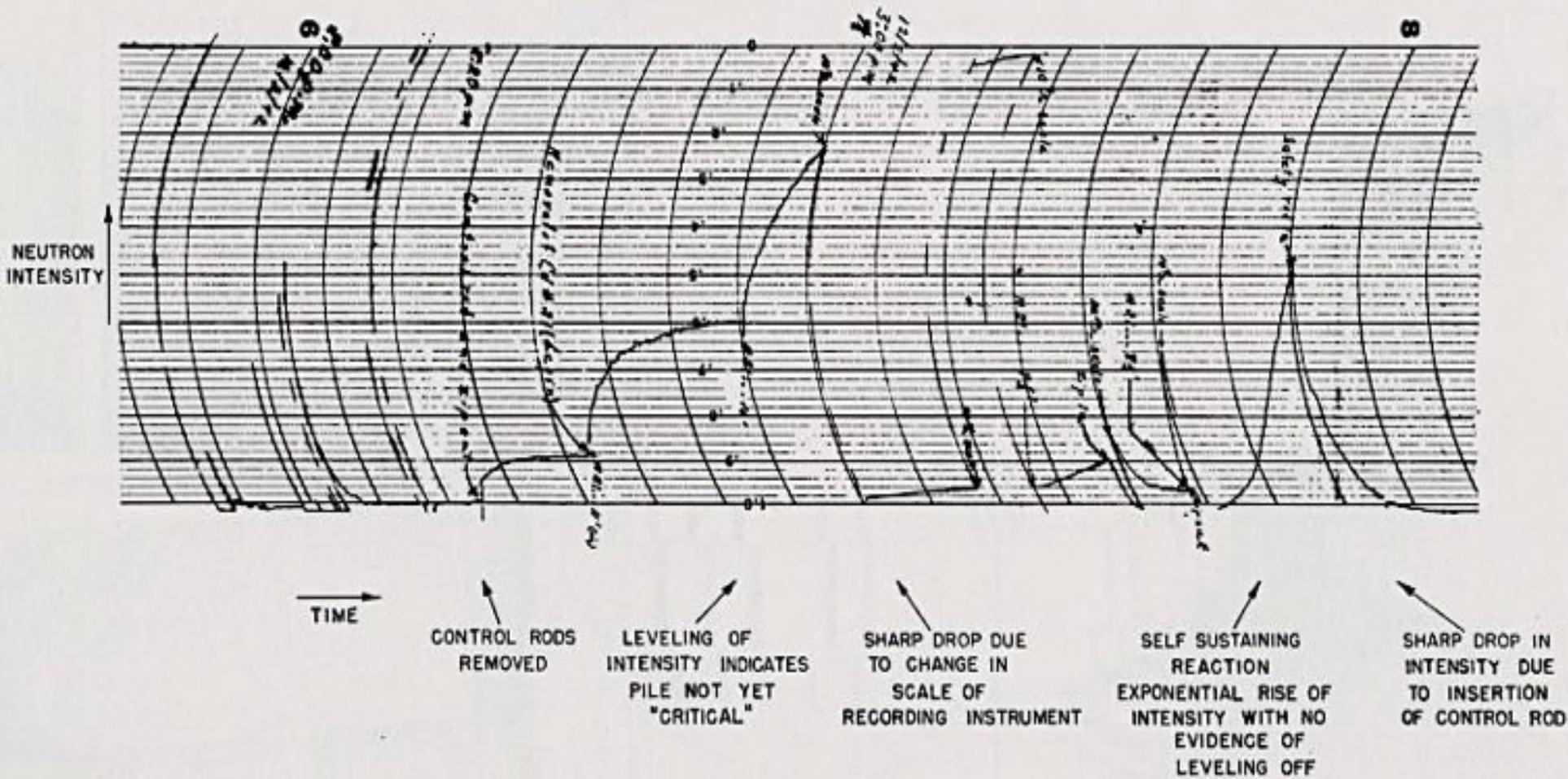
Juste avant que la pile arrive en régime critique, Fermi imposa une pause déjeuner.

Puis l'opération reprit et CP-1 passa le seuil critique à 15h20. Le flux de neutrons se mit à augmenter exponentiellement.

Au bout de 28 minutes, Fermi donna l'ordre de redescendre la barre de contrôle, le cliquetis du compteur de neutrons diminua puis s'arrêta. La réaction était stoppée.

# L'enregistrement du flux de neutrons de CP-1 le 2 décembre 1942

DEC. 2 1942 START-UP  
OF  
FIRST SELF-SUSTAINING CHAIN REACTION  
NEUTRON INTENSITY IN THE PILE AS RECORDED BY A GALVANOMETER





**La démonstration était faite qu'une réaction en chaîne continue et contrôlée était possible.  
La valeur de  $k$  avait été limitée à 1,0006**

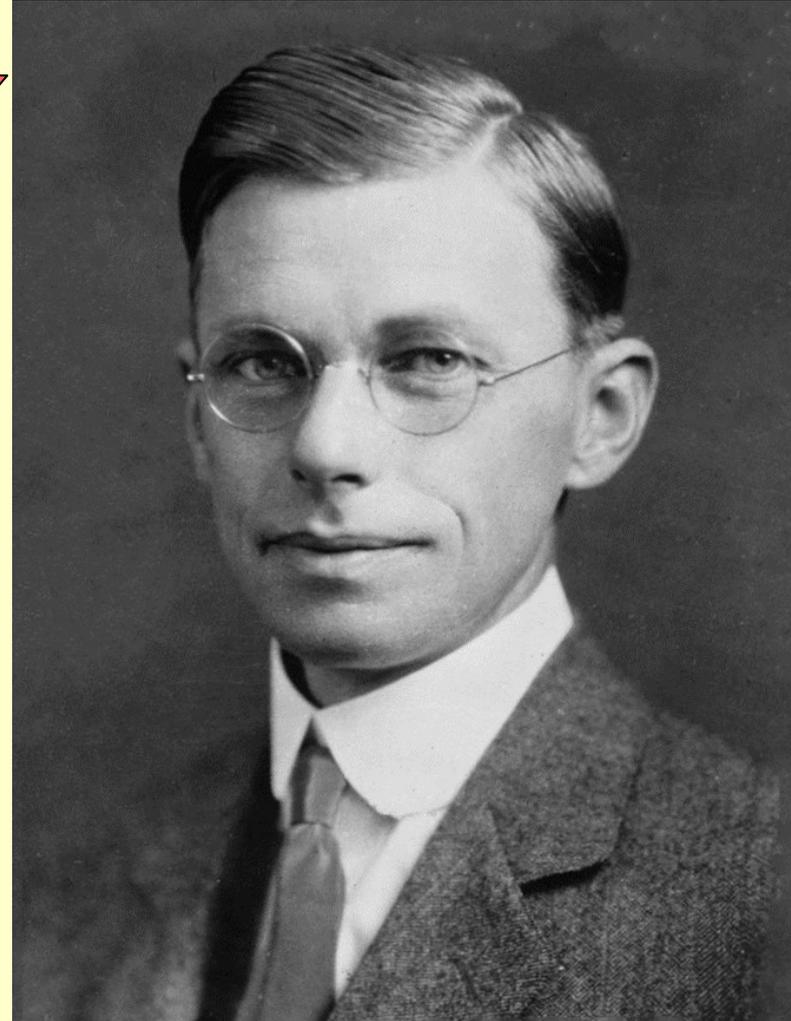
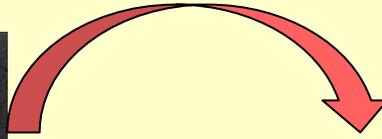
**puissance maximale :  
à peine 200 watts**

**December 2, 1942**



**Wigner offrit à  
Fermi une bouteille  
de Chianti qu'il  
avait apportée de  
Princeton pour le  
jour où Fermi  
réussirait la  
première réaction  
en chaîne contrôlée**

**Le message de succès envoyé par Arthur Compton à James Conant est resté célèbre :**



*« Le navigateur italien a abordé le rivage du nouveau monde et il a trouvé les indigènes amicaux. Le monde est plus petit qu'il le pensait. »*





**CP-1 fut démontée puis  
reconstruite, un peu  
différemment, sous le nom  
de CP-2 à Argonne, à  
l'écart de Chicago.**

**Elle atteignit une  
puissance de 100 kW**



THE WORLD'S FIRST NUCLEAR REACTOR  
WAS REBUILT AT THIS SITE IN 1943 AFTER  
INITIAL OPERATION AT THE UNIVERSITY OF CHICAGO  
THIS REACTOR (CP-2) AND THE FIRST HEAVY WATER  
MODERATED REACTOR (CP-3) WERE MAJOR FACILITIES  
AROUND WHICH DEVELOPED  
THE ARGONNE NATIONAL LABORATORY  
THIS SITE WAS RELEASED BY THE LABORATORY IN 1956  
AND THE U. S. ATOMIC ENERGY COMMISSION  
THEN BURIED THE REACTORS HERE.

# Classification périodique

## Classification Périodique

H 1																	He 2	
Li 3	Be 4											B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10	
Na 11	Mg 12											Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18		
K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22											Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36
Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40											Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54
Cs 55	Ba 56	57 à 71	Hf 72											Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86
Fr 87	Ra 88	89 à 103	Rf 104											Fl 114	Mc 115	Lv 116	Ts 117	Og 118



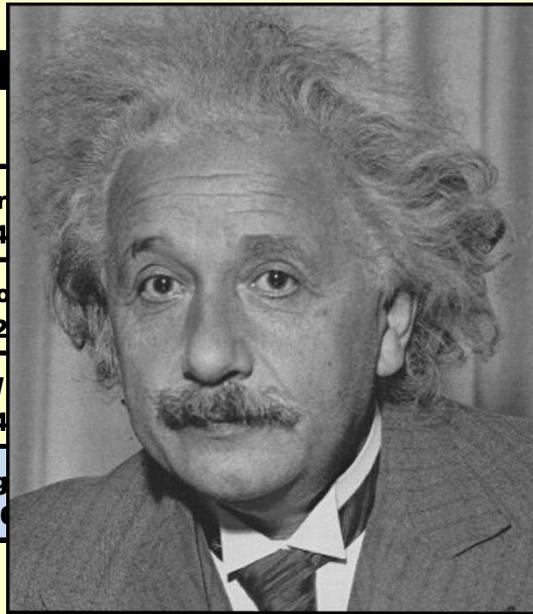
La 57	Ce 58	Pr 59	Nd 60	Pm 61	Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70	Lu 71
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

Ac 89	Th 90	Pa 91	U 92	Np 93	Pu 94	Am 95	Cm 96	Bk 97	Cf 98	Es 99	Fm 100	Md 101	No 102	Lr 103
----------	----------	----------	---------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	-----------	-----------	-----------	-----------

# Classification périodique

## Classification Périodique

H 1																	He 2				
Li 3	Be 4											B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10				
Na 11	Mg 12											Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18				
K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24											Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36
Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42											In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54
Cs 55	Ba 56	57 à 71	Hf 72	Ta 73	W 74											Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86
Fr 87	Ra 88	89 à 103	Rf 104	Db 105	Sg 106											Nh 113	Fl 114	Mc 115	Lv 116	Ts 117	Og 118



La 57	Ce 58	Pr 59	Nd 60	Pm 61	Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70	Lu 71
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

Ac 89	Th 90	Pa 91	U 92	Np 93	Pu 94	Am 95	Cm 96	Bk 97	Cf 98	Es 99	Fm 100	Md 101	No 102	Lr 103
----------	----------	----------	---------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	-----------	-----------	-----------	-----------

# Classification périodique

## Classification Périodique

H 1																	He 2					
Li 3	Be 4											B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10					
Na 11	Mg 12											Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18					
K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25											Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36
Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43											In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54
Cs 55	Ba 56	57 à 71	Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75											Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86
Fr 87	Ra 88	89 à 103	Rf 104	Db 105	Sg 106	Bh 107											Nh 113	Fl 114	Mc 115	Lv 116	Ts 117	Og 118

La 57	Ce 58	Pr 59	Nd 60	Pm 61	Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70	Lu 71
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

Ac 89	Th 90	Pa 91	U 92	Np 93	Pu 94	Am 95	Cm 96	Bk 97	Cf 98	Es 99	Fm 100	Md 101	No 102	Lr 103
----------	----------	----------	---------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	-----------	-----------	-----------	-----------

# Classification périodique

## Classification Périodique

H 1																	He 2
Li 3	Be 4											B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10
Na 11	Mg 12											Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18
K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25						Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36
Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43						In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54
Cs 55	Ba 56	57 à 71	Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75						Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86
Fr 87	Ra 88	89 à 103	Rf 104	Db 105	Sg 106	Bh 107						Nh 113	Fl 114	Mc 115	Lv 116	Ts 117	Og 118



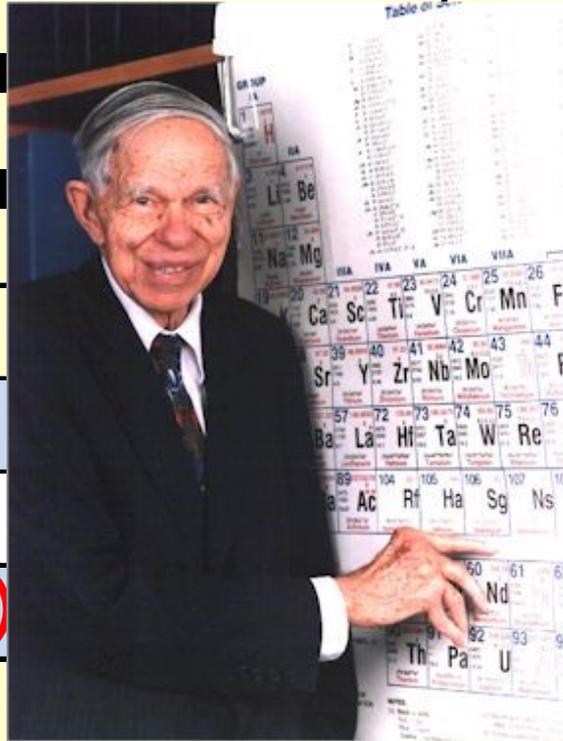
La 57	Ce 58	Pr 59	Nd 60	Pm 61	Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70	Lu 71
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

Ac 89	Th 90	Pa 91	U 92	Np 93	Pu 94	Am 95	Cm 96	Bk 97	Cf 98	Es 99	Fm 100	Md 101	No 102	Lr 103
----------	----------	----------	---------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	-----------	-----------	-----------	-----------

# Classification périodique

## Classification Périodique

H 1																	He 2			
Li 3	Be 4															C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10
Na 11	Mg 12															Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18
K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24											Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36
Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42											Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54
Cs 55	Ba 56	57 à 71	Hf 72	Ta 73	W 74											Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86
Fr 87	Ra 88	89 à 103	Rf 104	Db 105	Sg 106											Fl 114	Mc 115	Lv 116	Ts 117	Og 118



La 57	Ce 58	Pr 59	Nd 60	Pm 61	Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70	Lu 71
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

Ac 89	Th 90	Pa 91	U 92	Np 93	Pu 94	Am 95	Cm 96	Bk 97	Cf 98	Es 99	Fm 100	Md 101	No 102	Lr 103
----------	----------	----------	---------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	-----------	-----------	-----------	-----------

# Classification périodique

## Classification Périodique

H 1																	He 2											
Li 3	Be 4																	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10						
Na 11	Mg 12																	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18						
K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26																	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36
Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44																	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54
Cs 55	Ba 56	57 à 71	Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76																	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86
Fr 87	Ra 88	89 à 103	Rf 104	Db 105	Sg 106	Bh 107	Hs 108																	Fl 114	Mc 115	Lv 116	Ts 117	Og 118



La 57	Ce 58	Pr 59	Nd 60	Pm 61	Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70	Lu 71
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

Ac 89	Th 90	Pa 91	U 92	Np 93	Pu 94	Am 95	Cm 96	Bk 97	Cf 98	Es 99	Fm 100	Md 101	No 102	Lr 103
----------	----------	----------	---------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	-----------	-----------	-----------	-----------

# Classification périodique

## Classification Périodique

H 1																	He 2	
Li 3	Be 4																	Ne 10
Na 11	Mg 12																	Ar 18
K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Co 27	Ni 28							Kr 36		
Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46							Xe 54		
Cs 55	Ba 56	57 à 71	Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78							Rn 86		
Fr 87	Ra 88	89 à 103	Rf 104	Db 105	Sg 106	Bh 107	Hs 108	Mt 109	Ds 110							Og 118		



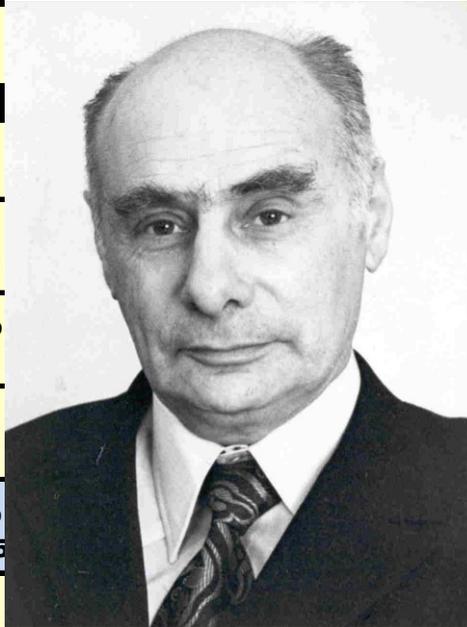
La 57	Ce 58	Pr 59	Nd 60	Pm 61	Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70	Lu 71
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

Ac 89	Th 90	Pa 91	U 92	Np 93	Pu 94	Am 95	Cm 96	Bk 97	Cf 98	Es 99	Fm 100	Md 101	No 102	Lr 103
----------	----------	----------	---------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	-----------	-----------	-----------	-----------

# Classification périodique

## Classification Périodique

H 1																	He 2					
Li 3	Be 4											B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10					
Na 11	Mg 12											Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18					
K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23											Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36
Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41											Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54
Cs 55	Ba 56	57 à 71	Hf 72	Ta 73											Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86
Fr 87	Ra 88	89 à 103	Rf 104	Db 105											Rg 111	Cn 112	Nh 113	Fl 114	Mc 115	Lv 116	Ts 117	Og 118



La 57	Ce 58	Pr 59	Nd 60	Pm 61	Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70	Lu 71
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

Ac 89	Th 90	Pa 91	U 92	Np 93	Pu 94	Am 95	Cm 96	Bk 97	Cf 98	Es 99	Fm 100	Md 101	No 102	Lr 103
----------	----------	----------	---------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	-----------	-----------	-----------	-----------



# Bibliographie

*De l'atome au noyau ; B. Fernandez ; Ed. Ellipses 2006*

*Pionniers de l'atome ; B. Goldschmidt ; Ed. Stock 1987*

# *Remerciements*

*La bibliothèque de la Société Nationale  
des Sciences Naturelles  
et Mathématiques de Cherbourg*

*et vous tous pour votre attention !*