

**Quelques applications  
de la radioactivité  
et des réactions nucléaires**


*CSNSM CNRS-IN2P3*

# Utilisation des rayonnements

## Positive

<b>Médecine</b>	imagerie, radio, scanner, scintigraphie radiothérapie stérilisation des matériels et des instruments
<b>Science</b>	datation (univers, sites), marquage
<b>Alimentation</b>	stérilisation et conservation
<b>Agriculture</b>	traceurs
<b>Industrie</b>	production d'énergie par fission (fusion ?)
<b>Environnement</b>	marquage
<b>Énergie</b>	production d'électricité

## Négative

Essais nucléaires et bombes		recherches en cours
Déchets		
Accidents (Three Miles Island, Tchernobyl)		

CSNSM CNRS-IN2P3

Les rayonnements peuvent être utilisés de différentes manières:

→ comme outils de suivi : des marqueurs (atomes radioactifs) étant introduits dans un milieu, il est ensuite aisé de détecter les rayonnements qu'ils émettent et de suivre leur devenir (applications en médecine, sciences, chaîne alimentaire, environnement ...),

→ en imagerie : l'atténuation d'un faisceau lors de sa traversée de la matière dépend des matériaux traversés et de leurs épaisseurs (investigations en médecine, sciences, industrie ...),

→ en traitement : l'énergie déposée par les rayonnements dans la matière vivante peut être importante et détruire les organismes (traitement des tumeurs, destruction des bactéries, stérilisation...).

Commentaire : les conséquences sur l'environnement des accidents de Three Mile Island (TMI) et de Tchernobyl ont été très différentes. A TMI, les produits radioactifs sont restés à l'intérieur de l'enceinte de confinement, alors qu'à Tchernobyl les produits radioactifs contenus dans le réacteur ont été dispersés dans l'environnement.

# Utilisation des rayonnements

## Positive

<b>Médecine</b>	imagerie, radio, scanner, scintigraphie radiothérapie stérilisation des matériels et des instruments
<b>Science</b>	datation (univers, sites), marquage
<b>Alimentation</b>	stérilisation et conservation
<b>Agriculture</b>	traceurs
<b>Industrie</b>	production d'énergie par fission (fusion ?)
<b>Environnement</b>	marquage
<b>Énergie</b>	production d'électricité

## Négative

**Essais nucléaires et bombes**  
**Déchets**  
**Accidents (Three Miles Island, Tchernobyl)**

CSNSM CNRS-IN2P3

Les rayonnements peuvent être utilisés de différentes manières:

→ comme outils de suivi : des marqueurs (atomes radioactifs) étant introduits dans un milieu, il est ensuite aisé de détecter les rayonnements qu'ils émettent et de suivre leur devenir (applications en médecine, sciences, chaîne alimentaire, environnement ...),

→ en imagerie : l'atténuation d'un faisceau lors de sa traversée de la matière dépend des matériaux traversés et de leurs épaisseurs (investigations en médecine, sciences, industrie ...),

→ en traitement : l'énergie déposée par les rayonnements dans la matière vivante peut être importante et détruire les organismes (traitement des tumeurs, destruction des bactéries, stérilisation....).

Commentaire : les conséquences sur l'environnement des accidents de Three Mile Island (TMI) et de Tchernobyl ont été très différentes. A TMI, les produits radioactifs sont restés à l'intérieur de l'enceinte de confinement, alors qu'à Tchernobyl les produits radioactifs contenus dans le réacteur ont été dispersés dans l'environnement.

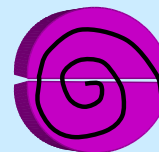
# La médecine : l'imagerie

*CSNSM CNRS-IN2P3*

## Principe de l'imagerie médicale

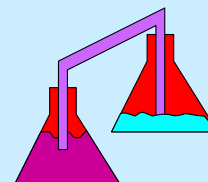
Production d'isotopes radioactifs avec un cyclotron  
(demi-vies de quelques heures)

Exemple :  $^{11}\text{C}$   $^{13}\text{N}$   $^{15}\text{O}$   $^{18}\text{F}$   $^{55}\text{Co}$   $^{76}\text{Br}$



Préparation du composé chimique désiré

Exemple : Fluoro Deoxy Glucose avec  $^{18}\text{F}$   
(demi-vie 110 minutes)



Injection du composé radioactif par voie intraveineuse



CSNSM CNRS-IN2P3

Des demi-vies de quelques heures

-sont assez longues pour faire la chimie et attendre que le composé choisi se fixe sur les endroits visés

-Assez courtes pour que la dose nécessaire pour la détection soit faible, et que la radioactivité devienne rapidement négligeable (divisée par 1000 en une journée)

Les composés chimiques choisis sont souvent des glucoses (ex. FDG FluoroDesoxyGlucose marqué au fluor 18) qui se fixent de préférence sur les tumeurs cancéreuses.

Après administration (par voie veineuse, orale ou autre) d'une petite quantité de traceur, le rayonnement permet de détecter sa répartition (la bio-distribution du traceur), et par conséquent d'étudier son devenir dans l'organe ou l'organisme.

La détection d'une molécule marquée (traceur radioactif) administrée à un organisme permet d'analyser la fonction des organes : la scintigraphie est une technique d'imagerie fonctionnelle.

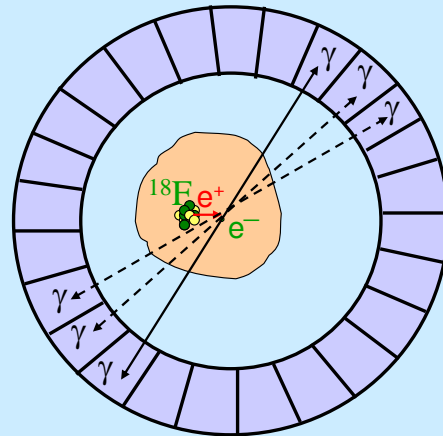
Si le traceur utilisé est un émetteur gamma (par exemple le technétium 99m,  $\text{Tc } 99\text{m}$ ). L'examen se fait avec une gamma caméra. C'est une scintigraphie par émission de simple photon.

Si le traceur utilisé est un émetteur de positons  $\beta^+$  (par exemple le fluorodésoxyglucose,  $^{18}\text{F}$ FDG). L'examen se fait avec une caméra à positons. C'est une tomoscintigraphie par émission de positons [TEP].

## La tomographie par émission de positrons



Prototype développé au CEA  
en 1983 (LETI- CEA)



Couronne de détecteurs  
+ coïncidence

*CNRS-IN2P3 et CEA-DSM-DAPNIA - T12*

Le patient est installé de manière à ce que la partie du corps à examiner (ici le cerveau), soit au centre d'une couronne de détecteurs.

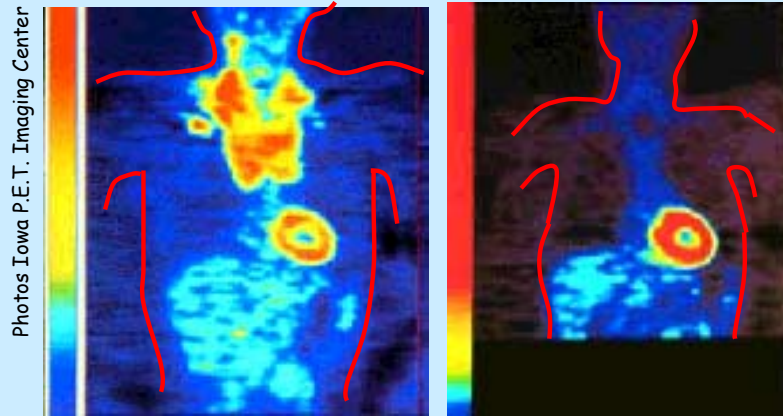
Le positron émis par le fluor 18 rencontre immédiatement un électron de la matière voisine et s'annihile en produisant une paire de photons gamma qui partent dos à dos.

Ces photons sont alors détectés en coïncidence par deux photomultiplicateurs de la couronne, placés à 180° l'un de l'autre.

Après avoir détecté un grand nombre de paires, on obtient une image en 3 dimensions de la zone de fixation du composé radioactif.

## Détection de tumeurs cancéreuses

Maladie de Hodgkin chez un homme de 35 ans  
(affection cancéreuse du système lymphatique)



Avant traitement

Un mois après la fin  
de la chimiothérapie

CSNSM CNRS-IN2P3

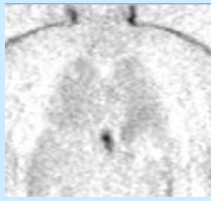
Tomographie par émission de positons :

Maladie de Hodgkin chez un patient de 35 ans avant traitement, et un mois après la fin de la chimiothérapie : les tumeurs ont complètement disparu.

(traceur : FluoroDesoxyGlucose (FDG) marqué au fluor 18). Le cœur fixe toujours le FDG

Photos Iowa P.E.T. Imaging Center

## Tomographie par émission de positrons combinée à un scanner



+



=



Image TEP Image TDM (scanner)

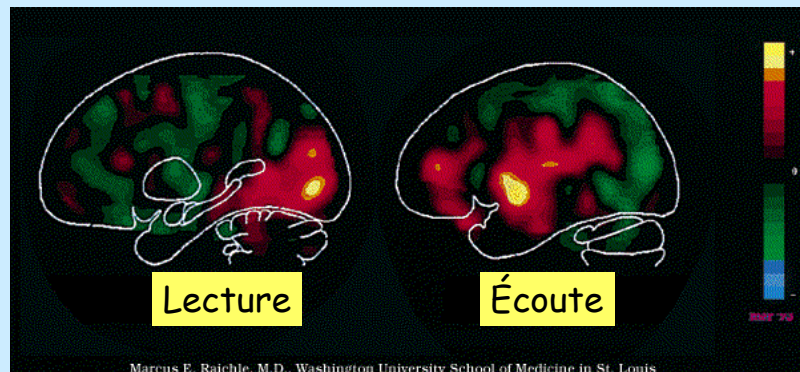
Images Centre Eugene de Rennes



CNRS-IN2P3 et CEA-DSM-DAPNIA - T12

Appareil récent combinant la tomographie par émission de positrons (TEP) et un scanner à rayonsX permettant une tomodensitométrie (TDM). Le scanner permet de corriger les différences d'absorption des rayons gamma de 511 keV selon la nature des tissus traversés. (Appareil Biograph de Siemens).

## Étude du fonctionnement du cerveau



**La lecture et l'écoute  
ne font pas travailler les mêmes zones du cerveau**

*CSNSM CNRS-IN2P3*

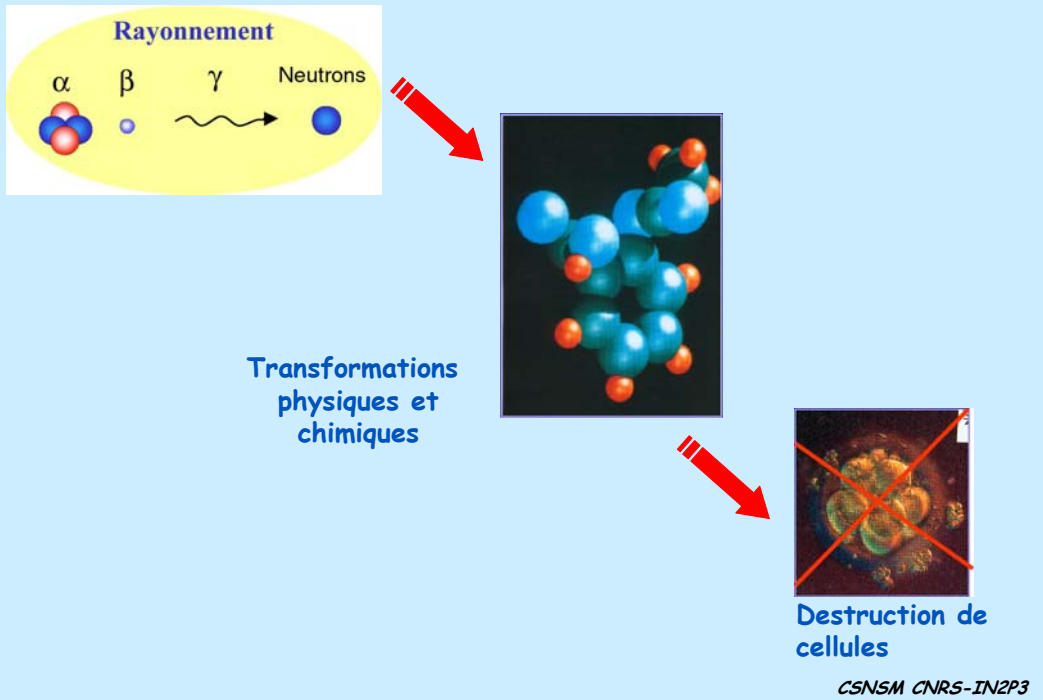
E. Marcus, M.D. Raiche Washington University School of  
Medecine in St Louis

Par tomographie par émission de positons avec du  
FluoroDesoxyGlucose (FDG) marqué au fluor 18, on voit  
quelles sont les zones du cerveau qui consomment du glucose.  
On observe que ce ne sont pas les mêmes zones selon que  
l'on lit des mots ou que l'on écoute parler

# La médecine : la thérapie

*CSNSM CNRS-IN2P3*

# Effets biologiques des rayonnements



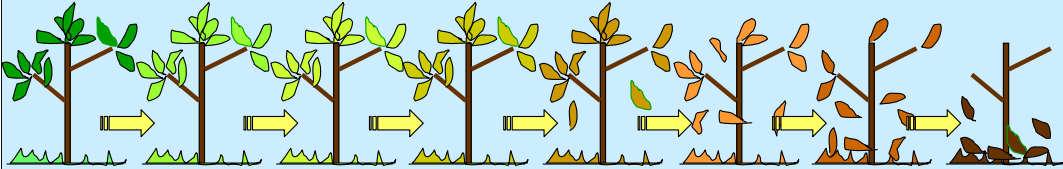
Les effets dus aux radiations sont de 2 types : les effets précoces et les effets tardifs.

Les effets précoces sont déterministes. Cela signifie qu'ils sont observés à partir d'une certaine dose. Par exemple au niveau des testicules, une dose localisée de 2 Sv entraîne une stérilité transitoire et une dose de 6 Sv une stérilité définitive. Au niveau de la peau, une dose locale de 3 à 8 Sv entraîne une rougeur passagère, une dose de 7 à 10 Sv une cloque et une dose supérieure à 10 Sv une nécrose.

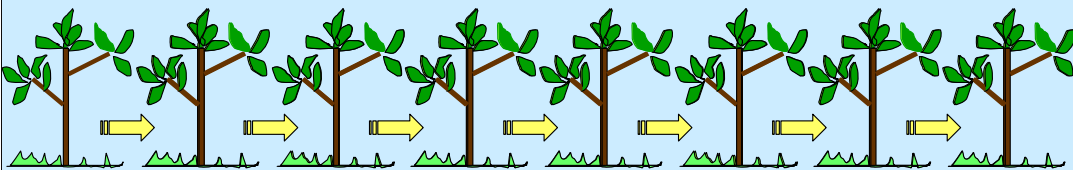
Les effets tardifs sont beaucoup plus délicats à traiter car ils sont probabilistes. Toutefois aucun effet mesurable n'a été mis en évidence au dessous de 100 mSv reçus à débit de dose élevée. Au dessus de 100 mSv, la probabilité d'occurrence de problèmes de cancers ou de leucémies augmente avec la dose. Cependant, quelle que soit la dose reçue, aucun effet héréditaire (problèmes cancérigènes transmis par des gènes irradiés) n'a jamais été observé chez l'homme.

## Principe de la radiothérapie

### Cellules cancéreuses



### Cellules saines



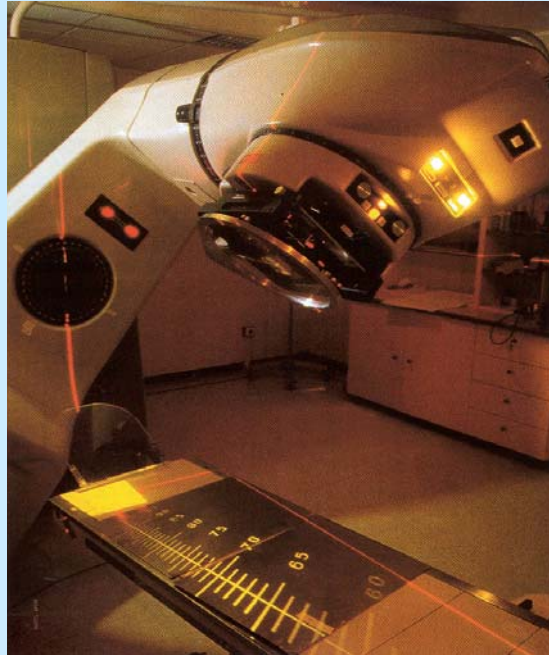
En radiothérapie, on envoie chaque jour une petite dose de rayonnement pendant 5 à 6 semaines. Ces petites doses provoquent des dégâts modérés dans les cellules.

Les cellules saines sont capables de réparer les dégâts subis d'un jour au suivant : elles vont donc pouvoir survivre.

Par contre, les cellules cancéreuses ne peuvent pas se réparer et vont donc peu à peu décliner.

## Lutte contre le cancer : la radiothérapie

Accélérateur d'électrons  
utilisé pour la  
radiothérapie



*CSNSM CNRS-IN2P3*

L'une des nombreuses qualités de cet appareil moderne de radiothérapie est de posséder une « tête isocentrique » grâce à laquelle il peut tourner autour d'un point fixe. Ceci lui permet d'irradier une tumeur prostatique ou le neurinome de l'acoustique (tumeur du nerf optique à l'intérieur de la boîte crânienne) par exemple.

Les progrès faits dans le diagnostic (IRM, scanner) permettent de détecter les tumeurs au début de leur formation.

## Lutte contre le cancer : la protonthérapie

### Traitement d'une tumeur du cerveau



La tête du patient est maintenue par un masque

*Centre de protonthérapie d'Orsay*

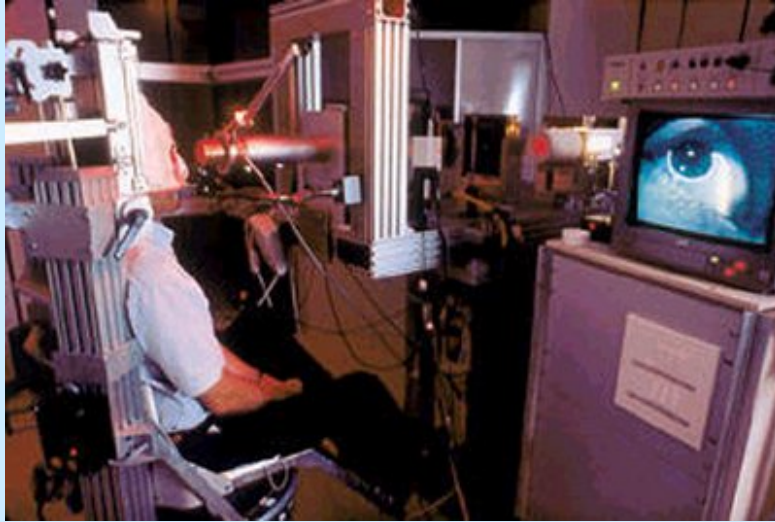
Les protons ont l'avantage de faire peu de dégâts sur leur parcours pendant qu'ils sont ralentis. Ce n'est qu'au moment où ils s'arrêtent que les dégâts sont importants. On peut ainsi minimiser la destruction de cellules saines. Ce point est très important dans le cas des tumeurs de l'œil ou du cerveau.

Le synchrocyclotron d'Orsay qui avait été construit dans les années 50 pour la physique a été reconverti en centre de protonthérapie en 1992.

Traitement d'une tumeur du cerveau : la tête du patient est immobilisée et des écrans protègent le reste du visage afin d'être sûrs que les protons touchent bien la zone visée. Un ralentisseur en plastique permet de couvrir l'ensemble du volume de la tumeur.

## Lutte contre le cancer : la protonthérapie

Traitement d'un mélanome de l'oeil



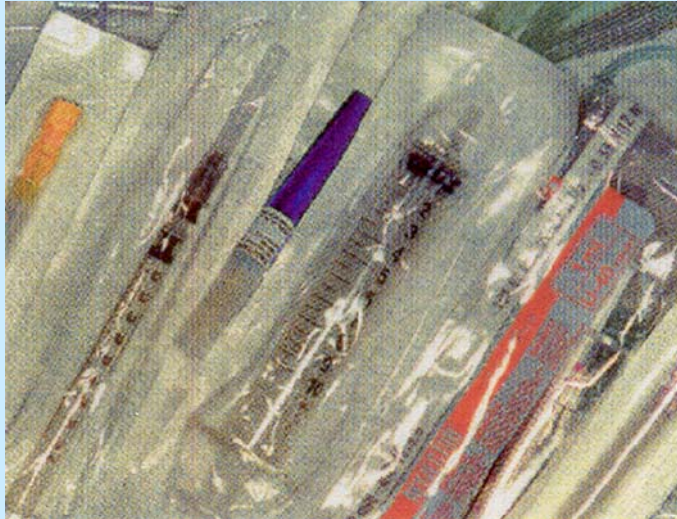
*Centre de protonthérapie d'Orsay*

Les protons ont l'avantage de faire peu de dégâts sur leur parcours pendant qu'ils sont ralentis. Ce n'est qu'au moment où ils s'arrêtent que les dégâts sont importants. On peut ainsi minimiser la destruction de cellules saines. Ce point est très important dans le cas des tumeurs de l'œil ou du cerveau.

Patient en traitement : <http://www.laradioactivite.com> © Centre de Protonthérapie d'Orsay

## Stérilisation et décontamination microbiologique

Produits chirurgicaux et médicaux traités dans leur emballage



*CSNSM CNRS-IN2P3*

### MODIFICATIONS CHIMIQUES

L'irradiation permet la destruction des bactéries, des moisissures, des insectes et des larves. Ce mode de stérilisation sans échauffement, idéal de ce fait pour les matériaux thermo-sensibles, est largement utilisé pour les produits chirurgicaux et médicaux qui peuvent être traités dans leur emballage.

# L 'Agriculture

*CSNSM CNRS-IN2P3*

## Irradiation de fruits et légumes



© CEA

CSNSM CNRS-IN2P3

Exemple d'accélérateur à électrons pour irradier fruits et légumes (CEA). En France , une trentaine d'installations de ce type ont été autorisées.

## Conservation des légumes



Oignons non irradiés

© CEA



Oignons ayant reçu une dose de 50 grays

© CEA

CSNSM CNRS-IN2P3

[www.laradioactivite.com](http://www.laradioactivite.com) © CEA

L'ionisation des aliments est utilisée pour les assainir et prolonger la durée de leur conservation. Elle permet notamment la destruction des parasites dans des denrées stockées.

Comparaison de la conservation d'oignons non irradiés et d'oignons ayant reçu une dose de 40 à 60 grays

Il existe de nombreux traitements. Seule la pasteurisation, conduisant à assurer la qualité hygiénique de certaines denrées, connaissent une pratique appréciable (20 000 tonnes par an en France). De plus, c'est une garantie extrêmement fiable d'élimination des salmonelles.

# Aliments irradiés en France



Tonnages des denrées traitées en France par ionisation de 1991 à 2003

	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Epices, aromates et légumes déshydratés	3 565	4 290	4 517	5 565	6 350	6 454	6 517	6 354	4 691	3 475	1 218	1 265	894
Gomme arabique	103	524	335	368	303	733	854	739	1 035	619	534	146	141
Fruits et légumes secs	417	473	533	550	266	52	537	365	189	74	17	14	21
Herbes aromatiques surgelées	157	44	244	244	119	111	128	126	112	78	18	10	4
Flocons de céréales pour produits laitiers	24	41	24	55	91	59	70	40	1	1	0	0	2
Farine de riz	0	0	0	0	19	106	0	53	31	0	0	0	0
Bulbes (ail, échalote...)	0	0	0	0	0	0	36	0	0	0	0	0	0
VSM (viandes séparées mécaniquement)	4 203	6 978	3 249	8 801	4 608	6 690	6 800	10 449	6 187	2 758	4 222	2 812	2 290
Cuisses de grenouilles congelées	741	871	361	217	1 295	424	363	711	706	789	878	882	1 006
Crevettes congelées décortiquées ou étêtées	174	160	16	182	53	36	79	29	48	7	0	0	10
Sang déshydraté	91	43	117	512	157	208	372	559	376	189	38	0	0
Blanc d'œuf	5	90	48	30	23	17	18	219	1 254	860	0	0	0
Caséines, caséinates	1 129	947	938	1 210	494	494	279	249	82	3	0	0	15
Aliments pour animaux de laboratoire	58	83	211	125	107	17	26	28	20	0	0	21	0
Colostrum bovin	0	2	5	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Quantité totale traitée</b>	<b>10 667</b>	<b>14 546</b>	<b>10 598</b>	<b>17 862</b>	<b>13 885</b>	<b>15 401</b>	<b>16 079</b>	<b>19 921</b>	<b>14 732</b>	<b>8 853</b>	<b>6 925</b>	<b>5 150</b>	<b>4 383</b>

Source : DGCCRF

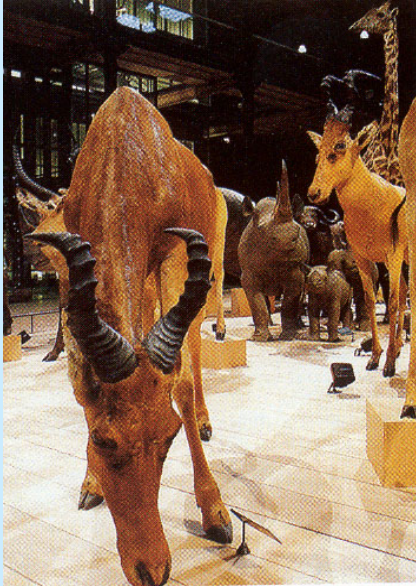
CSNSM CNRS-IN2P3

# L'Industrie

*CSNSM CNRS-IN2P3*

## De nouveaux matériaux

### La grande galerie du Muséum national d'histoire naturelle



Le bois du parquet est imprégné d'une résine radio-durcissable obtenue par irradiation. On crée ainsi un nouveau matériau « bois densifié », véritable alliage de bois et de plastique.

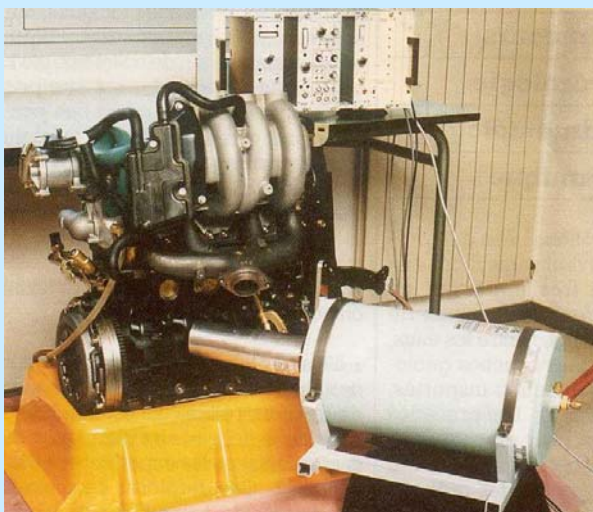
CSNSM CNRS-IN2P3

L'irradiation par faisceau d'électrons est le procédé utilisé pour stériliser certains produits ou pour améliorer la qualité de certains autres.

Lorsque le matériau à traiter est soumis à un flux d'électrons d'énergie appropriée, des liaisons moléculaires peuvent se briser ou se former. La création de nouvelles liaisons améliore leur solidité. Grâce à ce procédé, les encres et les peintures sèchent presque instantanément sur les boîtes de boissons, les papiers cadeaux ou les emballages glacés.

Il est aussi possible d'imprégner du bois par une résine radio-durcissable obtenue par irradiation et de créer un nouveau matériau « bois densifié », véritable alliage de bois et de plastique. Ce nouveau matériau conserve l'aspect esthétique agréable du bois mais il est plus dur, plus stable et résiste aux insectes et aux moisissures.

## Analyse par activation



L'analyse par activation est réalisée en mesurant des rayonnements spécifiques émis par une réaction nucléaire.

Ici, l'activation d'une pièce d'un moteur d'automobile permet de calculer sa vitesse d'usure.

CSNSM CNRS-IN2P3

Pierre et Marie Curie ont été les premiers à imaginer de doser les éléments en détectant les rayonnements émis par leurs isotopes radioactifs.

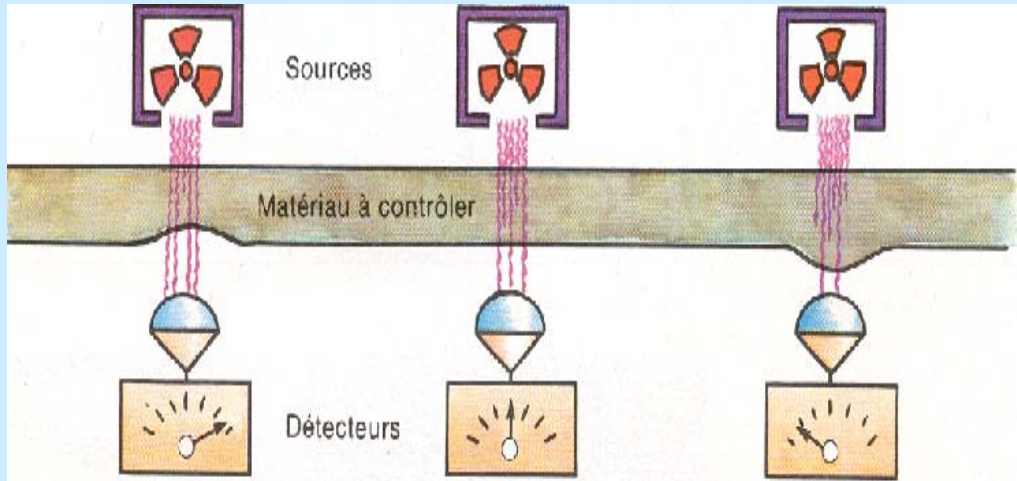
La méthode est fondée sur l'identification et la mesure des rayonnements spécifiques émis par une réaction nucléaire, ou par des radio-nucléides obtenus par réaction nucléaire. L'analyse par activation est donc indépendante de l'état physique de l'élément à doser (solide, liquide, ou gaz).

Il faut citer le très faible seuil de détection qui peut atteindre  $10^{-12}$  gramme pour certains éléments.

Les domaines d'applications sont très diversifiés : métallurgie, chimie, électronique, génie atomique, catalyse, textiles, biologie, minéralogie, géologie, pollution, expertise, archéologie.

Si l'intérêt principal de l'analyse par activation est le dosage des traces d'éléments, il faut signaler aussi des applications intéressantes pour les constituants majeurs dans de très faibles quantités de matière (poussières, produits de corrosion, échantillons biologiques...).

## Jauges d'épaisseur, de densité ou d'homogénéité



*Jean Castor - GREPS - LPC-Clermont-Ferrand (IN2P3-CNRS-Université Blaise Pascal) - T25*

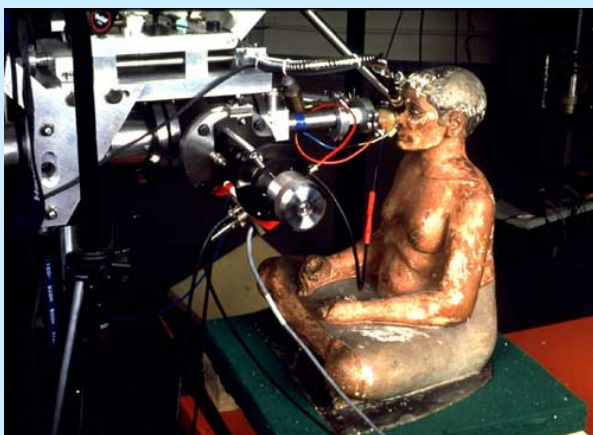
Les jauges d'épaisseur, de densité ou d'homogénéité utilisent la mesure du degré d'atténuation des rayonnements par la pièce à contrôler. Le signal issu du détecteur est souvent relié à des systèmes d'automatisation. Les jauges sont utilisées dans la fabrication du papier, des tôles... pour localiser des zones de corrosion, pour contrôler des épaisseurs de plaquage, d'émail, de peinture, de galvanisation.

# Les arts

*CSNSM CNRS-IN2P3*

## Diagnostic du patrimoine : Louvre

©D. BAGAUT/LRMF



Analyse des yeux du scribe avec l'accélérateur AGLAE au Louvre

©LRMF



Les yeux et le nombril d'Ishtar sont en rubis de Birmanie

CSNSM CNRS-IN2P3

[www.laradioactivite.com](http://www.laradioactivite.com) ©Dominique BAGAUT/LRMF

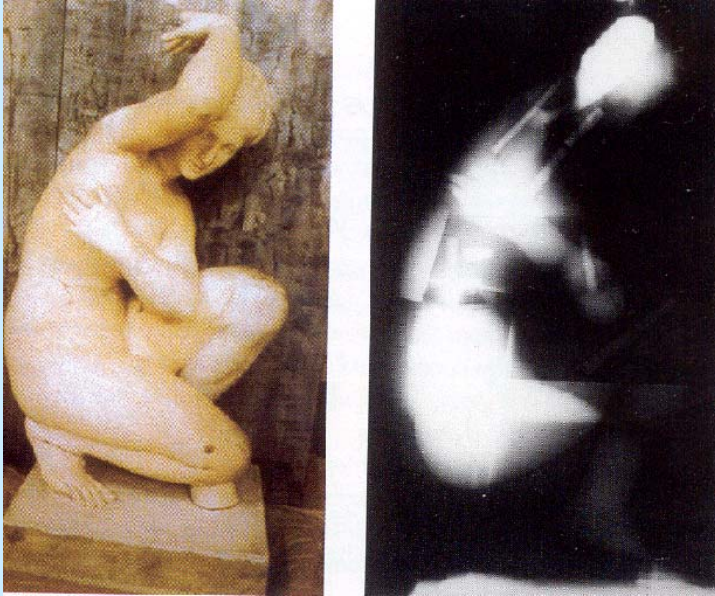
L'analyse des yeux de ce scribe a été faite par AGLAE, le petit accélérateur du Louvre.

[www.laradioactivite.com](http://www.laradioactivite.com) ©LRMF

L'analyse par PIXE des yeux et du nombril de cette statuette d'ISHTAR, déesse parthe de l'amour, avec AGLAE a permis de déterminer qu'ils étaient en rubis provenant de Birmanie

## Un exemple de gammagraphie

Aphrodite accroupie, exposée au Musée du Louvre



La gammagraphie met en évidence les consolidations de cette statue de marbre

*CSNSM CNRS-IN2P3*

Les rayonnements gamma qui sont beaucoup plus pénétrants que les rayons X permettent de faire des radiographies sur des objets beaucoup plus denses.

## Protection du patrimoine : Ramsès II

La momie de Ramsès 2  
a été débarassée de ses parasites  
par irradiation en 1977 à Saclay

© art nucléaire



CSNSM CNRS-IN2P3

[www.laradioactivite.com](http://www.laradioactivite.com) © art nucléaire

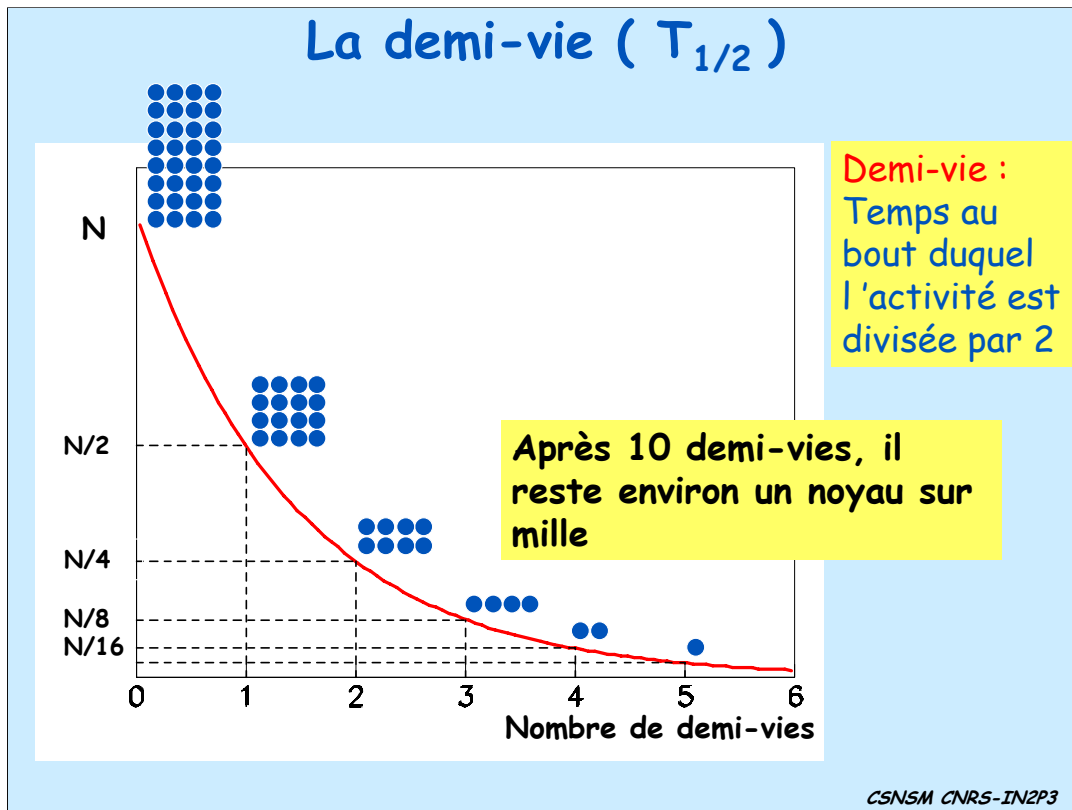
La momie de Ramsès 2 qui était infestée de larves et de champignons a été sauvée par irradiation en 1977 à Saclay

L'irradiation d'œuvres d'art, de mobiliers précieux, de documents, de monnaies... évite leur détérioration par des microorganismes parasites. Les rayonnements permettent de restaurer et de protéger des œuvres menacées. C'est le cas de la momie de Ramsès II, restaurée récemment.

Momie de Ramsès II au Musée de l'Homme, avant sa stérilisation par rayonnement gamma  
Momie de Ramsès II au Musée de l'Homme, avant sa stérilisation par rayonnement gamma

# La science

*CSNSM CNRS-IN2P3*

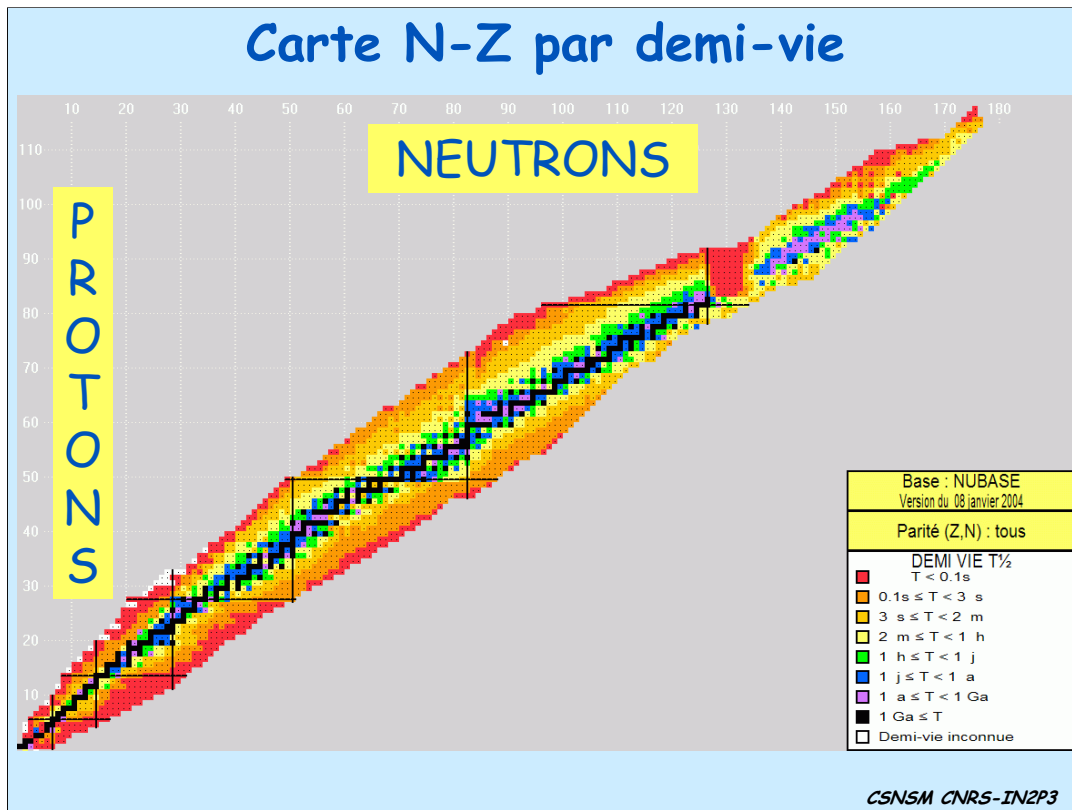


À chaque demi-vie, le nombre de noyaux restants est divisé par 2

La forme exponentielle de la décroissance et la définition de la demi-vie permettent de comprendre deux applications importantes :

→ si la demi-vie d'un noyau formé à l'origine de l'univers est très grande, de l'ordre de 15 milliards d'années, celui-ci est encore présent aujourd'hui et il est donc possible d'observer sa décroissance (technique de datation).  
Connaissant la demi-vie d'un élément et son activité initiale, la mesure de son activité au temps  $t$  permet de dater un objet ou un matériau.

→ sachant par exemple qu'il faut attendre 10 demi-vies pour qu'il reste environ un noyau sur 1000, le temps d'attente pour que des déchets ne présentent plus de danger est d'autant plus bref que leur demi-vie est courte.



Plus on s'éloigne de la stabilité plus les demi-vies sont brèves...

# La datation par le carbone 14

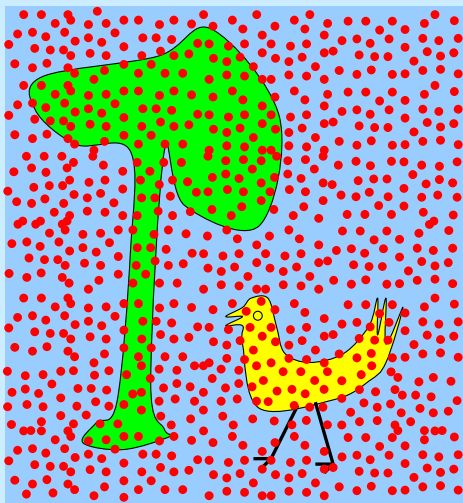
## Quelques isotopes du carbone

${}^9\text{C}$	${}^{10}\text{C}$	${}^{11}\text{C}$	${}^{12}\text{C}$	${}^{13}\text{C}$	${}^{14}\text{C}$	${}^{15}\text{C}$	${}^{15}\text{C}$	
126 ms	19 s	20 mn	stable	stable	5700 a	2,5 s	750 ms	

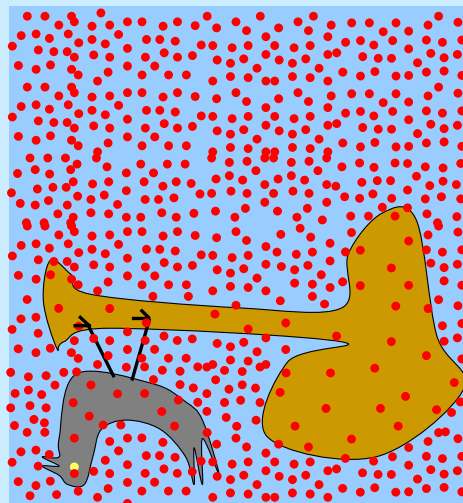
98,9% 1,1%

CSNSM CNRS-IN2P3

## La datation par le carbone 14



Le monde vivant  
échange avec l'atmosphère



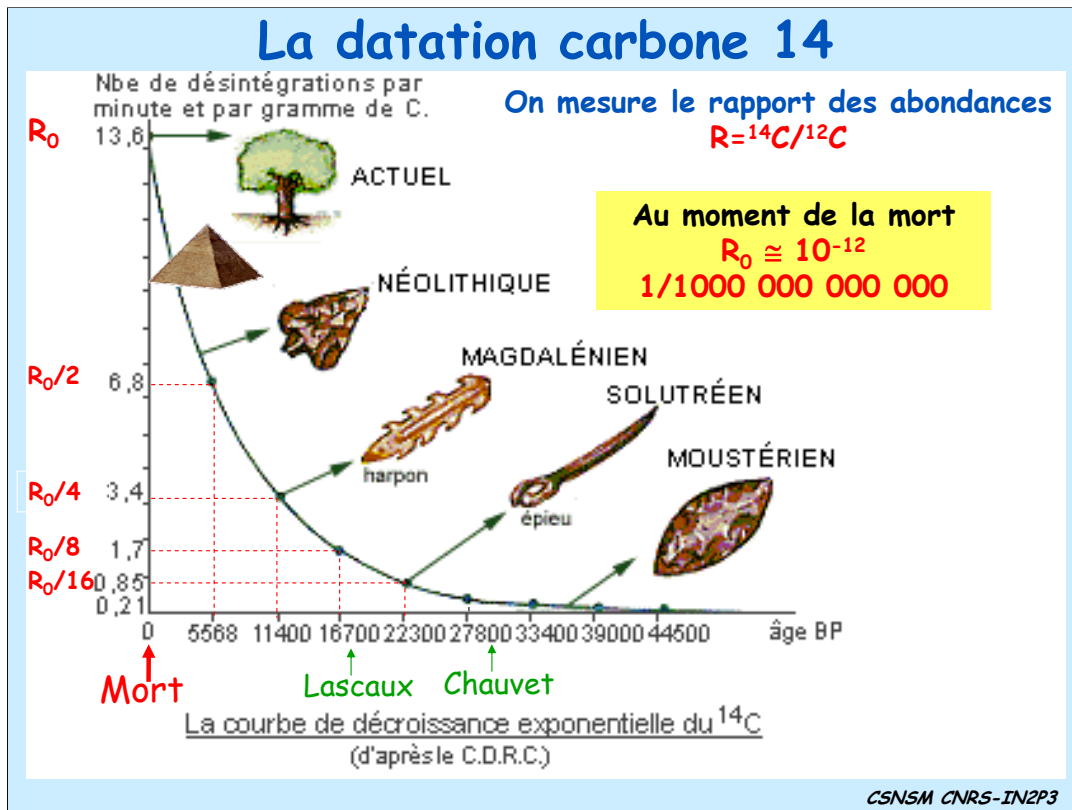
Quand la mort survient, les échanges  
s'arrêtent : le carbone 14 décroît  
avec une demi-vie de 5730 ans

*CSNSM CNRS-IN2P3*

Les points rouges représentent le carbone 14 qui est radioactif avec une demi-vie de 5340 ans. Le carbone 14 est produit par interaction des rayons cosmiques avec l'atmosphère. Sa Proportion par rapport au carbone 12 (stable) est à peu près constante au cours du temps (et on possède un étalonnage précis en fonction du temps, grâce à d'autres méthodes comme la croissance des arbres)

Quand l'arbre ou l'oiseau sont vivants, ils échangent du gaz carbonique avec l'atmosphère, et la proportion carbone 14/carbone 12 est identique à celle de l'atmosphère.

Par contre, si l'arbre ou l'oiseau meure, les échanges s'arrêtent et le carbone 14 décroît. Après 5730 ans le rapport carbone 14/carbone 12 n'est plus que la moitié de ce qu'il est dans l'atmosphère. Après 11000 ans, il n'est plus que  $\frac{1}{4}$ ,...



À chaque demi-vie, le nombre de noyaux restants est divisé par 2

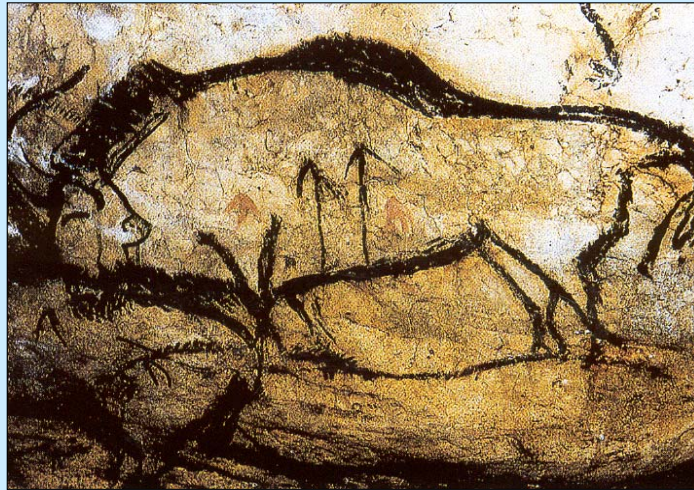
Connaissant la demi-vie d'un élément et son activité initiale, la mesure de son activité au temps  $t$  permet de dater un objet ou un matériau.

On connaît l'activité à  $t = 0$  et on mesure l'activité de l'échantillon au temps  $t$  :  $[a(t)]$ .

Si  $T$  est la demi-vie du noyau, l'équation:  $a(t) = a(0) e^{-\lambda t}$  avec  $\lambda = \text{Ln}2/T$  permet de calculer l'âge d'un objet.

Dans le cas du carbone 14 ( $T = 5730$  ans), connaissant le rapport  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  lorsque l'organisme est vivant  $[a(0)]$ , la mesure de ce même rapport sur un matériau  $[a(t)]$  permet de calculer son âge.

## Exemple de datation au carbone 14



Bison de la grotte de Niaux dans l'Ariège,  
daté à 13000 ans par le carbone 14

*CSNSM CNRS-IN2P3*

Le gaz carbonique présent dans l'atmosphère contient du carbone 12 stable et une très faible proportion de carbone 14 radioactif, formé continuellement par le rayonnement cosmique, et dont la période est de 5730 ans.

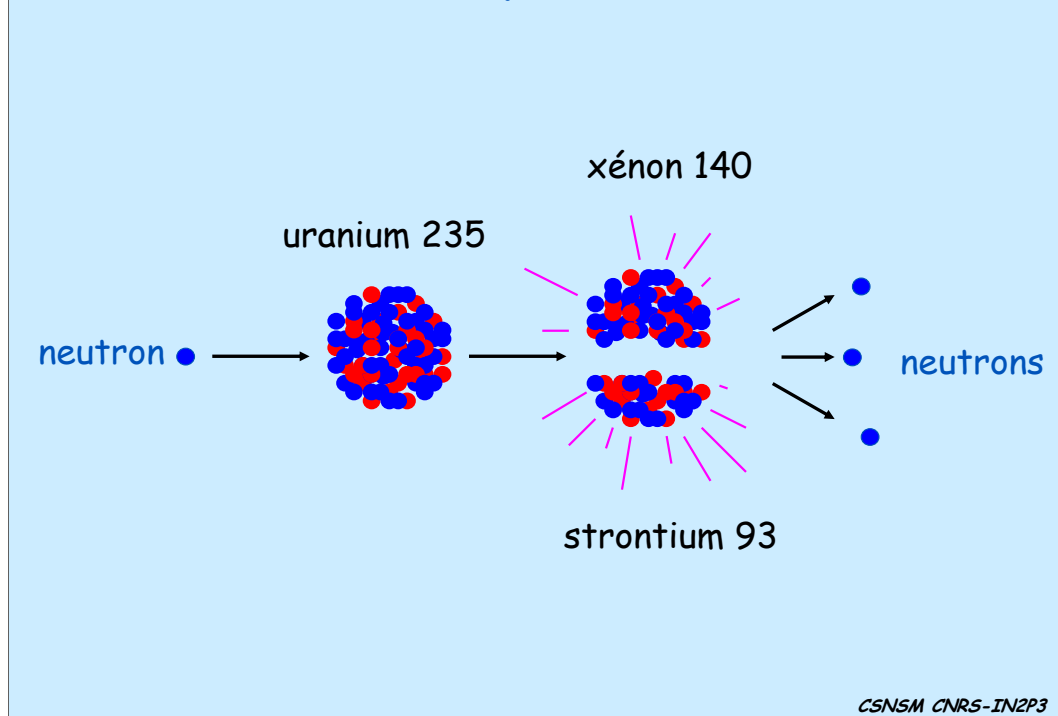
Le gaz carbonique est échangé en permanence entre l'atmosphère et le monde vivant. Dès qu'un organisme meurt, le carbone 14 n'est plus renouvelé. Comme cet isotope se désintègre, sa proportion par rapport au carbone 12 se met alors à décroître et constitue une horloge. Moins il reste de carbone 14 dans l'échantillon à dater et plus il est ancien. Le carbone 14 est particulièrement utilisé pour déterminer l'âge d'objets de moins de 40 000 ans.

Par contre, si l'animal ou la plante meurt, les échanges s'arrêtent et le carbone 14 décroît. Après 5000 ans le rapport carbone 14/carbone 12 n'est plus que la moitié de ce qu'il est dans l'atmosphère. Après 10000 ans, il n'est plus que  $\frac{1}{4}$ ,...

# La fission

*CSNSM CNRS-IN2P3*

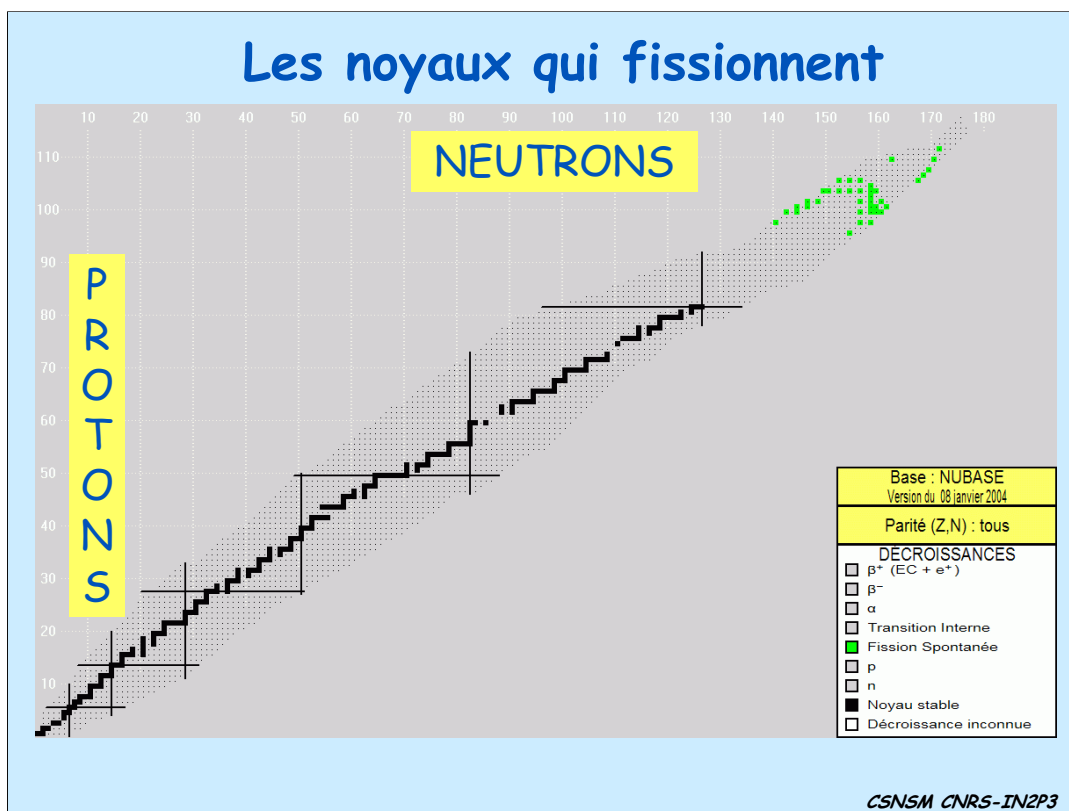
## La fission



Une autre forme de radioactivité est la fission.

Ce sont seulement les noyaux très lourds, comme l'uranium ou le thorium, qui fissionnent. Ils se cassent alors en 2 morceaux en laissant échapper des neutrons.

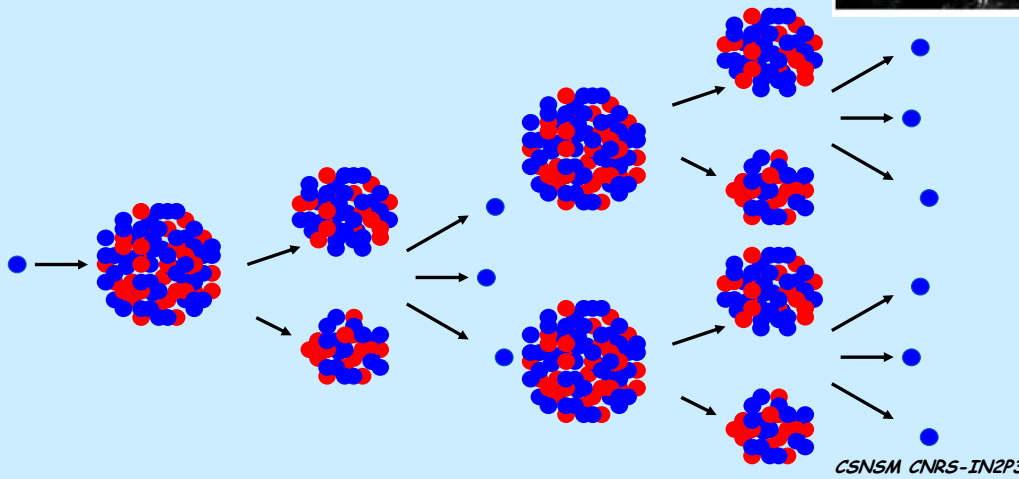
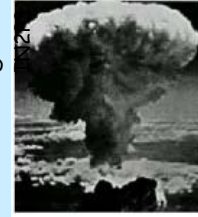
Même quand la fission est énergétiquement avantageuse, elle est rarement spontanée. Cependant, pour les noyaux facilement fissionnables, il suffit d'un petit apport d'énergie, par choc avec un neutron par exemple, pour déclencher la fission.



Ce sont seulement les noyaux très lourds, comme l'uranium ou le thorium, qui fissionnent. Ils se cassent alors en 2 morceaux en laissant échapper des neutrons.

## Processus de réaction en chaîne

Les neutrons émis peuvent provoquer d'autres fissions...



Les neutrons émis au moment de la fission peuvent eux-mêmes provoquer d'autres fissions, créant ainsi une réaction en chaîne qui peut devenir explosive

C'est le cas dans les armes nucléaires.

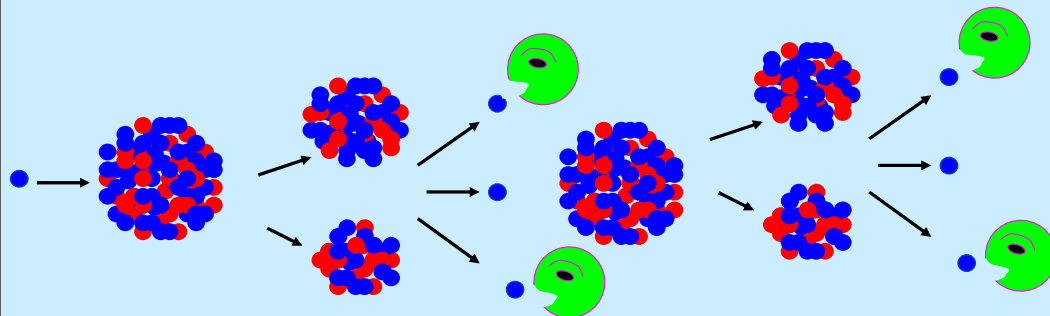
[www.laradioactivite.com](http://www.laradioactivite.com) © IN2P3

## Contrôle des réactions en chaîne

La fission peut être contrôlée grâce à des matériaux mangeurs de neutrons



© LA MEDIATHEQUE EDF/M Morceau



CSNSM CNRS-IN2P3

Pour contrôler la réaction en chaîne dans un réacteur destiné à produire de l'énergie électrique, on introduit des barres de contrôle faites d'un matériau "mangeur de neutrons", tel que le cadmium qui absorbe les neutrons sans en rémettre. Pour que la réaction en chaîne se poursuive en douceur, il faut ajuster les mangeurs de neutrons pour ne laisser qu'un neutron par fission (régime critique). Avec moins d'un neutron, la réaction en chaîne s'éteint. Avec plus d'un neutron, la réaction peut devenir explosive.

La centrale électrique de Paluel en Haute Normandie. Filière REP (Réacteurs à Eau Pressurisée) Chaque tranche fournit 1,3 millions de kilowatts électriques

[www.laradioactivite.com](http://www.laradioactivite.com) © LA MEDIATHEQUE EDF/Marc Morceau (1990)

## Les découvertes...et leurs conséquences

1895	Roëntgen	découverte des rayons X
1896	Becquerel	découverte de la radioactivité dans un minéral d'uranium
1898	Pierre & Marie Curie	extraction du polonium et du radium
1911	Rutherford	mise en évidence du noyau
1932	Chadwick	découverte du neutron
1934	Irène Curie & Frédéric Joliot	découverte de la radioactivité artificielle
1939	Hahn, Strassman & Meitner	découverte de la fission
1942	Fermi	réaction nucléaire en chaîne
1945	1 <sup>ères</sup> armes nucléaires	6 août Hiroshima 9 août Nagasaki
1979	Three Miles Island	fusion d'un cœur de réacteur
1986	Tchernobyl	destruction d'un réacteur
2003	Dans le monde	443 réacteurs en fonctionnement

CSNSM CNRS-IN2P3

La fission et les réactions nucléaires en chaîne ont été découvertes dès 1939-1942.

La première utilisation a été pour les armes nucléaires envoyées sur 2 villes du Japon en 1945.

Par la suite, on a construit des réacteurs nucléaires pour produire de l'électricité.

Il y a eu 2 accidents.

A TMI, l'accident n'a pas eu de conséquences graves car les produits radioactifs sont restés confinés dans l'enceinte prévue à cet effet.

Par contre à Tchernobyl, l'enceinte n'a pas résisté et les produits radioactifs ont été disséminés dans l'atmosphère.

# La production d'énergie par fission

*CSNSM CNRS-IN2P3*

## Le cœur d'un réacteur nucléaire

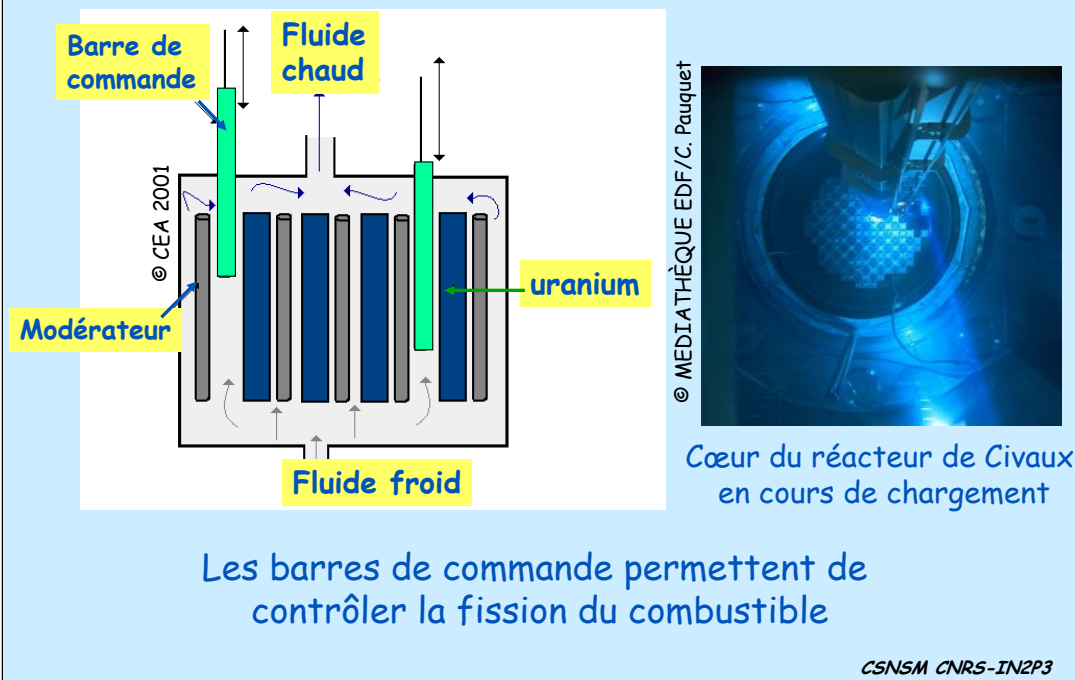


Schéma du cœur d'un réacteur : [www.cea.fr/Fiches/Reacteur/Mode.htm](http://www.cea.fr/Fiches/Reacteur/Mode.htm) © CEA 2001

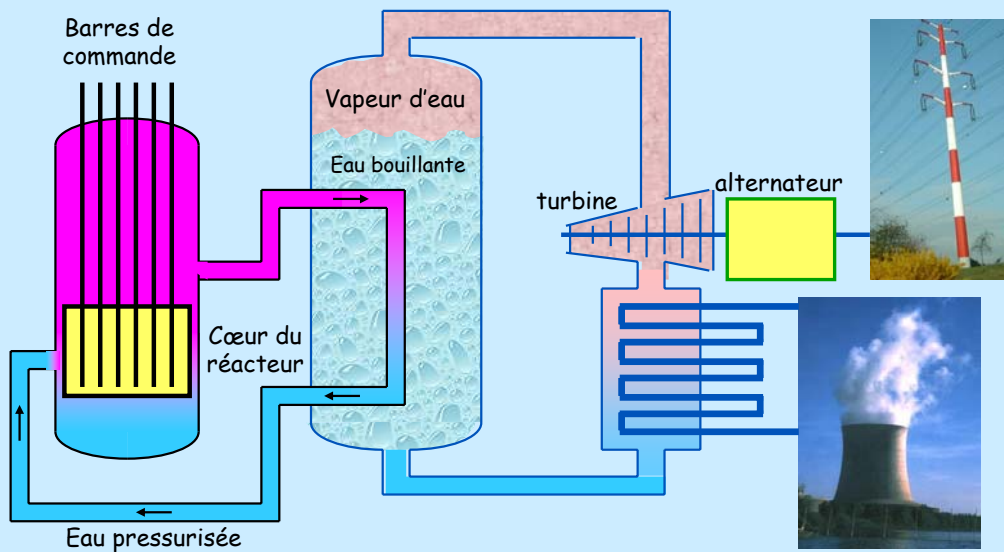
Cœur du réacteur de Civaux en Poitou Charentes : [www.laradioactivite.com](http://www.laradioactivite.com) © LA MEDIATHEQUE EDF/Claude Pauquet

Les barres de commande servent à contrôler la réaction en chaîne en "mangeant" une partie des neutrons.

Le modérateur (ex. du bore) ralentit les neutrons émis qui sont trop rapides pour provoquer efficacement des fissions.

Le fluide caloporteur (ex. de l'eau) est chauffé dans le cœur.

## Schéma d'un réacteur nucléaire



Les barres de commande permettent de contrôler la fission du combustible.  
Il y a 3 circuits de fluides indépendants, dont 2 sont en circuit fermé.

*CSNSM CNRS-IN2P3*

[www.cea.fr/Fiches/Reacteur/Rep.htm](http://www.cea.fr/Fiches/Reacteur/Rep.htm) © CEA 2001

Les barres de commande servent à contrôler la réaction en chaîne.

Le fluide caloporteur chauffé dans le cœur échange sa chaleur avec un 2ème circuit qui fait fonctionner la turbine.

Cette eau est ensuite refroidie par échange avec un 3ème circuit.

## Stockage des déchets peu radioactifs

Les déchets sont mis  
dans des fûts métalliques



En fin de remplissage,  
le site est fermé



Les fûts sont  
enfermés  
dans du béton



CSNSM CNRS-IN2P3

Phase 1 au centre de l'Aube [www.laradioactive.com](http://www.laradioactive.com) © ANDRA

Phase 2 au Centre de la Manche avant sa fermeture  
[www.laradioactive.com](http://www.laradioactive.com) © ANDRA

Phase 3 au Centre de la Manche maintenant fermé  
[www.laradioactive.com](http://www.laradioactive.com) © ANDRA

les déchets de faible et moyenne radioactivité sont placés dans des fûts métalliques ( Les fûts sont disposés de manière à former des couches isolées les unes des autres par du béton.

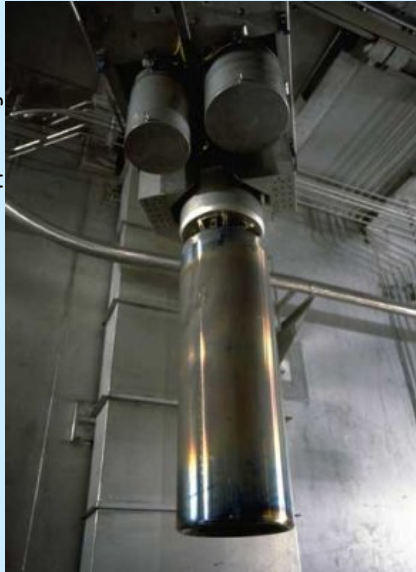
## Stockage des déchets très radioactifs

© CEA



Les déchets sont vitrifiés et coulés dans des containers métalliques

© Philippe Lesage/COGEMA



puis stockés dans des entrepôts refroidis

CSNSM CNRS-IN2P3

Les déchets sont vitrifiés dans l'usine de La Hague : [www.laradioactivite.com](http://www.laradioactivite.com) © CEA

Ils sont ensuite placés dans des cellules de refroidissement car la radioactivité des déchets vitrifiés produit des quantités importantes de chaleur : [www.laradioactivite.com](http://www.laradioactivite.com) © Philippe Lesage/COGEMA

# La production d'énergie par fusion

*CSNSM CNRS-IN2P3*

## Processus de fusion

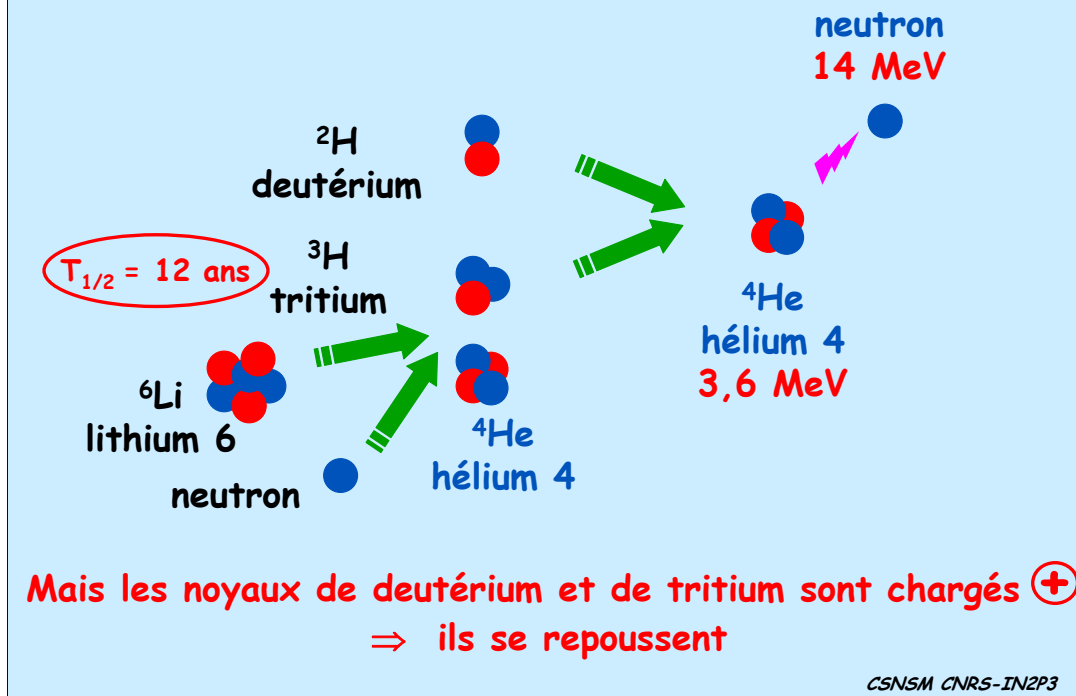


Deux noyaux fusionnent pour n'en former qu'un seul  
en libérant de l'énergie

*CSNSM CNRS-IN2P3*

Certains noyaux peuvent fusionner en libérant de l'énergie. Contrairement à la fission qui concerne des noyaux lourds, la fusion se produit pour des noyaux légers

## La fusion sur terre

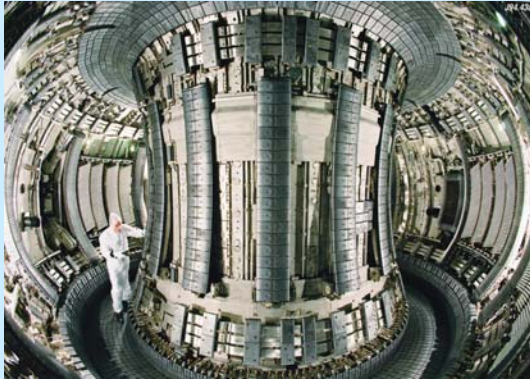


Le problème est de faire se rapprocher suffisamment les noyaux alors que leurs charges électriques positives les repoussent loin l'un de l'autre.

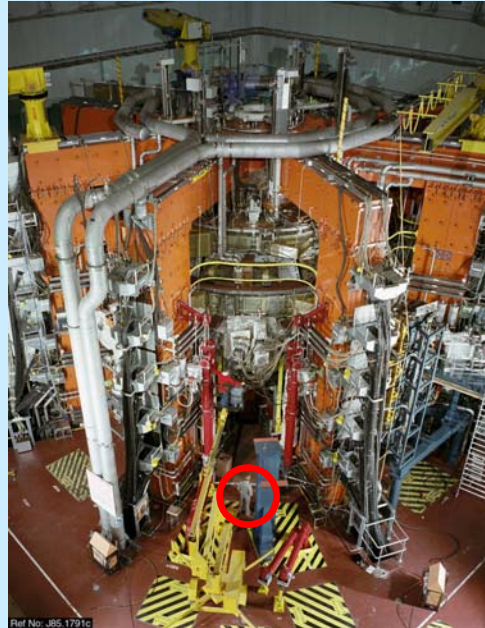
La fusion d'un noyau de deutérium et d'un noyau de tritium est le cas le plus favorable pour être utilisé sur terre afin de produire de l'énergie. Dans le soleil, ce ne sont pas les mêmes réactions de fusion qui sont en jeu car le combustible de départ est uniquement constitué de protons, alors que sur terre on peut choisir.

Sur terre, le deutérium naturel est abondant, et le tritium dont la demi-vie est courte (12 ans) est produit à partir du lithium 6 qui est également abondant.

## Fusion par tokamak : JET



JET ,the Joint European Torus

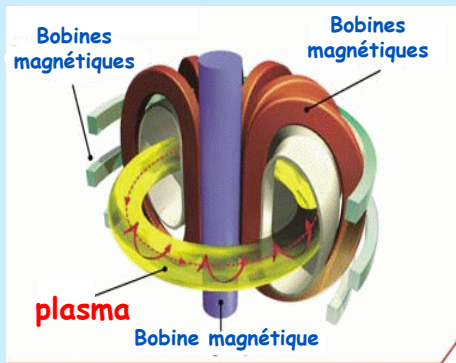


CSNSM CNRS-IN2P3

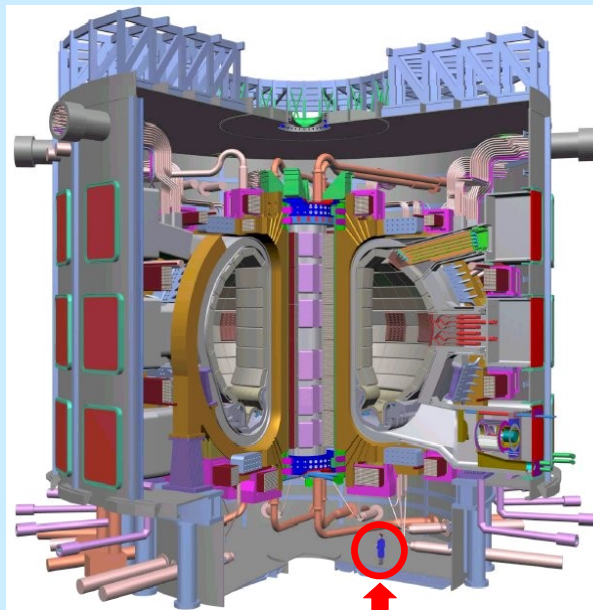
Un premier instrument de plus petite taille (mais pas si petit que cela!) a déjà été construit et testé avec succès par les Européens : il s'agit du JET qui était installé en Grande Bretagne.

On voit des photos de l'intérieur, et de l'extérieur avec des personnages qui donnent l'échelle.

## Fusion par tokamak : Iter



### Le projet ITER



échelle humaine

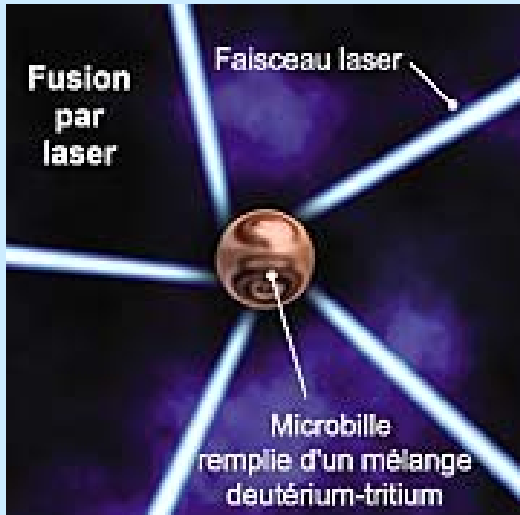
CSNSM CNRS-IN2P3

Une première possibilité de rapprocher les noyaux est de former un plasma très chauds (10 fois la température du centre du soleil) confiné dans un anneau par des champs magnétiques très intenses. Cette méthode inventée par les russes est appelée « tokamak » qui est une abréviation de l'appellation russe.

Basé sur ce principe, le projet ITER est actuellement en discussion au niveau mondial. Les sites proposés sont soit le Japon, soit la France, à Cadarache. Cependant si la conclusion n'était pas en faveur de Cadarache, le projet pourrait y être réalisé quand même par une collaboration plus restreinte.

ITER est un appareil d'étude et non pas un premier réacteur à fusion. Il doit permettre d'étudier le comportement du plasma en vraie grandeur. Si les essais sont concluants, du tritium pourrait être injecté pour induire des réactions de fusion.

## Fusion par laser



© CEA/A. Gonin



© Yuvanoë

CSNSM CNRS-IN2P3

Le combustible (deutérium-tritium) est placé dans une petite bille. Des faisceaux lasers pulsés, très puissants convergent sur cette bille. L'enveloppe de la bille chauffe et se contracte. Le combustible est chauffé et comprimé jusqu'à ce que sa densité soit suffisamment grande pour que la fusion démarre.

## Quelques sites Web

- ◆ <http://www.laradioactivite.com>
- ◆ <http://voyage.in2p3.fr/frames.html>
- ◆ <http://www.cea.fr/fr/pedagogie/science.htm>
- ◆ <http://www.cea.fr/fr/pedagogie/TPE.htm>
- ◆ [http://www.cea.fr/fr/pedagogie/Energie\\_ms/energie\\_nu\\_cleaire.htm](http://www.cea.fr/fr/pedagogie/Energie_ms/energie_nu_cleaire.htm)
- ◆ <http://www.sfen.org/fr/intro/atomes.htm#>
- ◆ [http://www-csasm.in2p3.fr/AMDC/web/nubdisp\\_fr.html](http://www-csasm.in2p3.fr/AMDC/web/nubdisp_fr.html)
- ◆ <http://www-csasm.in2p3.fr/nominatif/thibault/>

CSNSM CNRS-IN2P3