

Risques du nucléaire



NPA 49

Risques du nucléaire

I. Qu'est-ce que la fission nucléaire ?

II. Radioactivité et risques sanitaires

III. Les risques dans l'industrie nucléaire

IV. Les déchets nucléaires

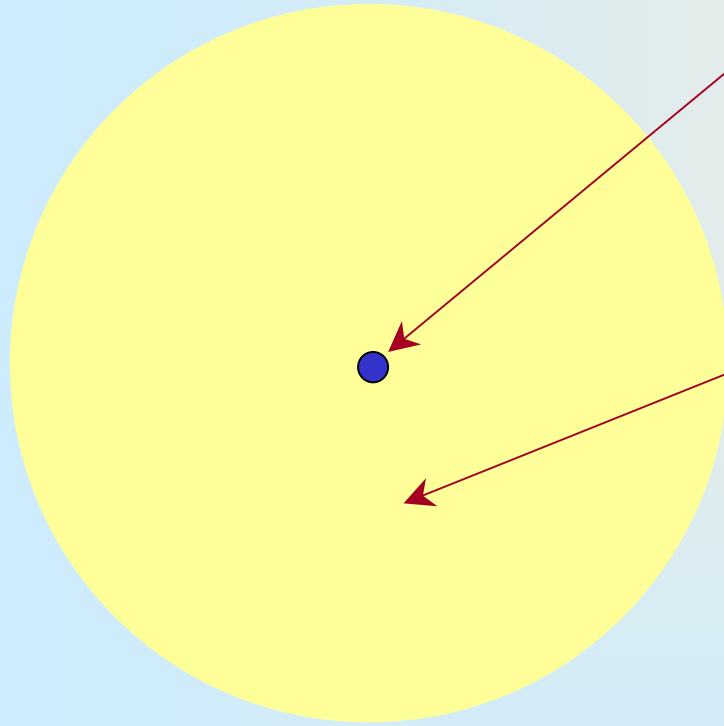
V. Conclusion :

Au delà de la science, un choix politique

I. Qu'est-ce que la fission nucléaire ?

- 1. Qu'est-ce qu'un atome ?**
- 2. Qu'est-ce qu'un noyau ?**
- 3. Qu'est-ce qu'un défaut de masse ?**
- 4. Qu'est-ce qu'un isotope ?**
- 5. Qu'est-ce que la radioactivité ?**
- 6. Qu'est-ce qu'une fission nucléaire ?**
- 7. Quelle utilisation de la fission nucléaire ?**

1. Qu'est-ce qu'un atome ?



Noyau (protons et neutrons)

Charge positive : $+Ze$

diamètre : quelques fm

Electrons (nuage électronique)

Charge négative : $-Ze$

Masse négligeable

diamètre : de 0,9 à 5 Å

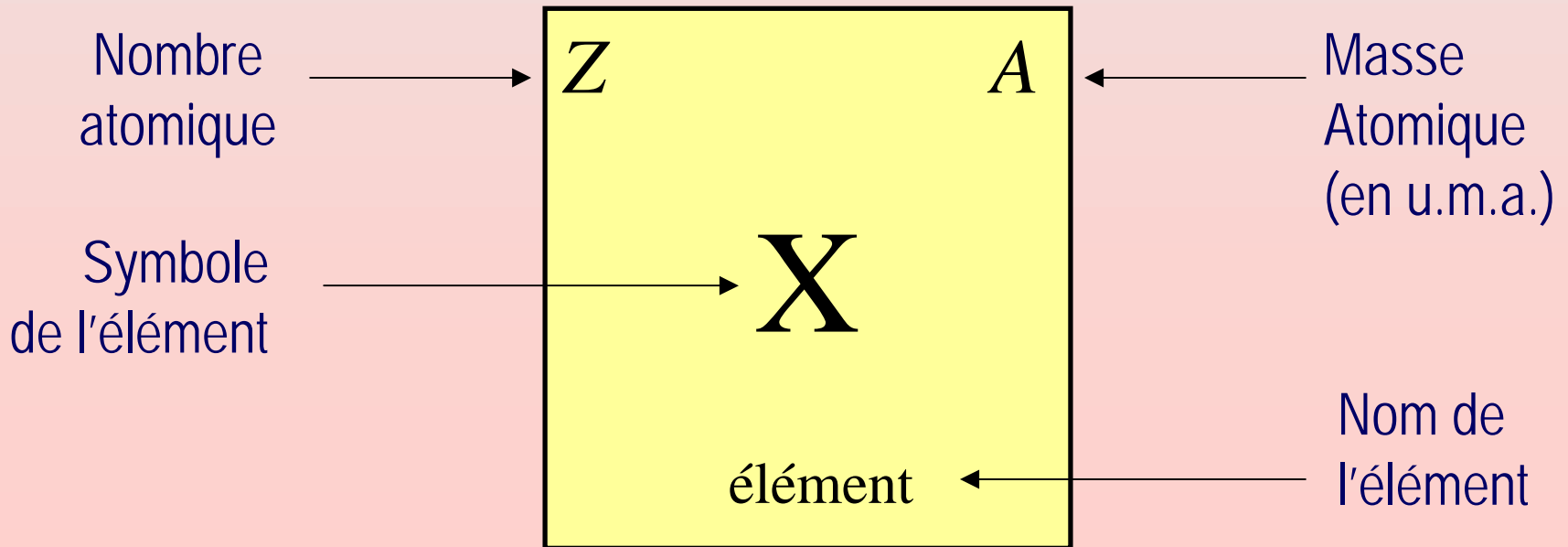
$1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$ (Fermi)

$1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ m}$ (Angström)

2. Qu'est-ce qu'un noyau ?

Noyau = collage de A *nucléons* (par *liaisons fortes*)
de masses individuelles voisines de l'unité de masse
atomique ($1 \text{ u.m.a.} \approx 1,661 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$) ;

- a) Z *protons* chargés positivement ($+e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$) ;
- b) $A-Z$ *neutrons* électriquement neutres.



3. Qu'est-ce qu'un défaut de masse ?



Masse M du noyau $<$ masse des Z protons et $A-Z$ neutrons.

$$\Delta M = [Z m_p + (A - Z) m_n] - M > 0$$

$E = \Delta M c^2$ est l'**énergie** de liaison des nucléons, celle qu'il faut apporter pour briser le noyau.

Plus l'énergie de liaison *par nucléon* est élevée, plus le noyau est stable



Pour les noyaux lourds (A élevé), le défaut de masse *par nucléon* est d'autant plus faible que le noyau est lourd.

\Rightarrow Les noyaux très lourds sont moins stables.

4. Qu'est-ce qu'un isotope ?

Isotopes = famille d'atomes identiques du point de vue électronique (Z protons) mais avec un nombre différent de neutrons.



Dans la nature, il existe surtout des isotopes *stables*.



Les isotopes *instables* se désintègrent (radioactivité) et sont donc généralement peu présents dans les milieux naturels (compte tenu de l'âge de la planète). **Les plus radioactifs sont produits de façon artificielle par l'industrie nucléaire.**



Les isotopes instables sont caractérisés par leurs « *temps de demi-vie* », soit le temps au bout duquel le nombre de ces isotopes a été divisé par deux (loi de décroissance exponentielle). Ce temps peut varier de quelques millisecondes à des milliards d'années !

^{137}Cs : 30 ans – ^{239}Pu : 24 000 ans – ^{235}U : $7 \cdot 10^8$ ans – ^{238}U : $4,5 \cdot 10^9$ ans

5. Qu'est-ce que la radioactivité ?

Radioactivité : désintégration d'un noyau instable par émission de particules possédant une masse et de **photons** γ (*très énergétiques*).

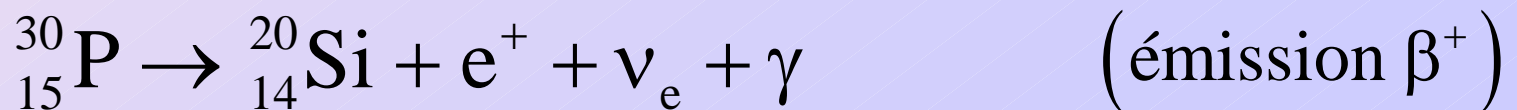
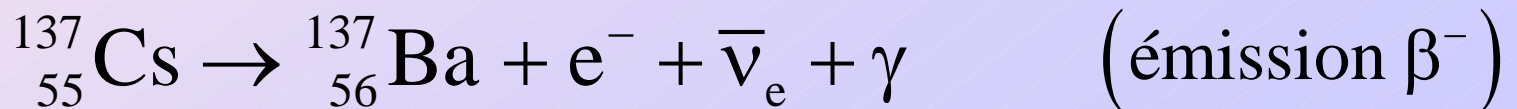
Une désintégration par seconde = 1 becquerel (Bq)



Radioactivité α : émission d'un **noyau d'hélium**.

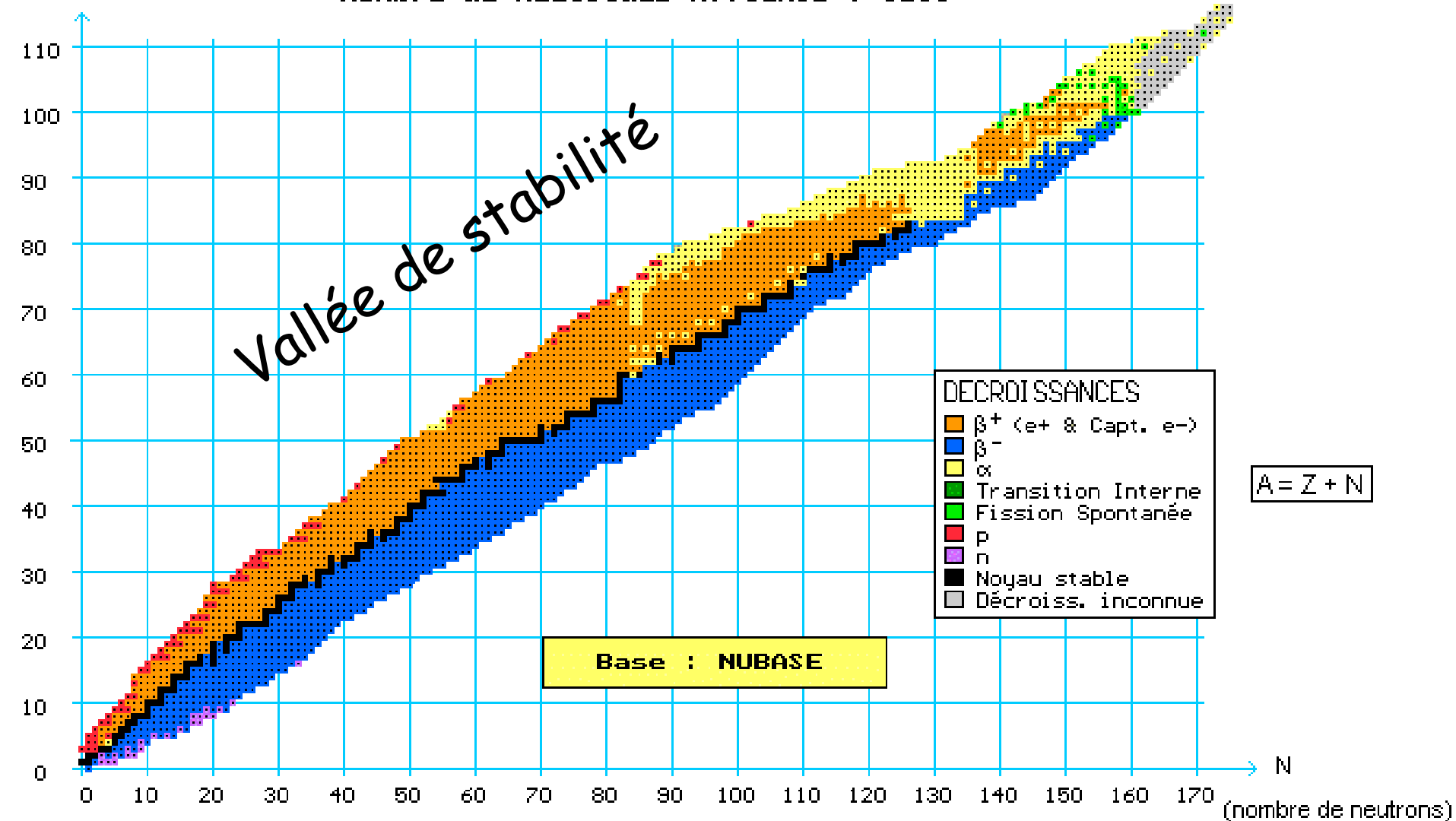


Radioactivité β : émission d'un électron e^- ou d'un positon e^+ (et de neutrinos ν) accompagnée d'une **transmutation** d'un neutron en proton ou réciproquement.



Z (nombre de protons)

Nombre de Nucléides Affichés : 3156



Nucléide stable le plus lourd : Bismuth-209 (83 protons, 126 neutrons)

6. Qu'est-ce qu'une fission nucléaire ?

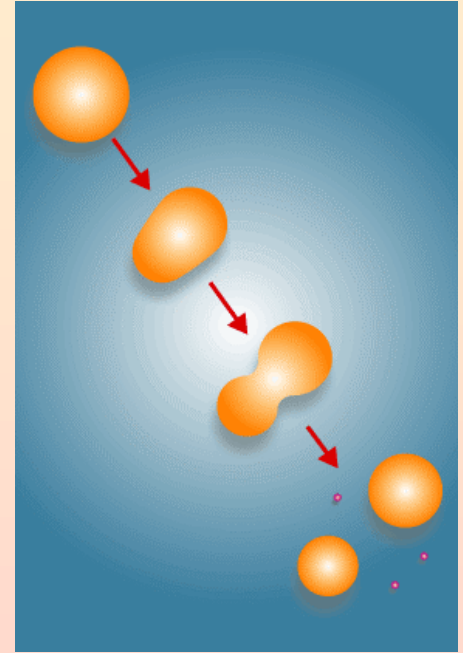
Fission : éclatement d'un **noyau lourd** *instable* en au moins deux parties, généralement à la suite d'un *impact*.

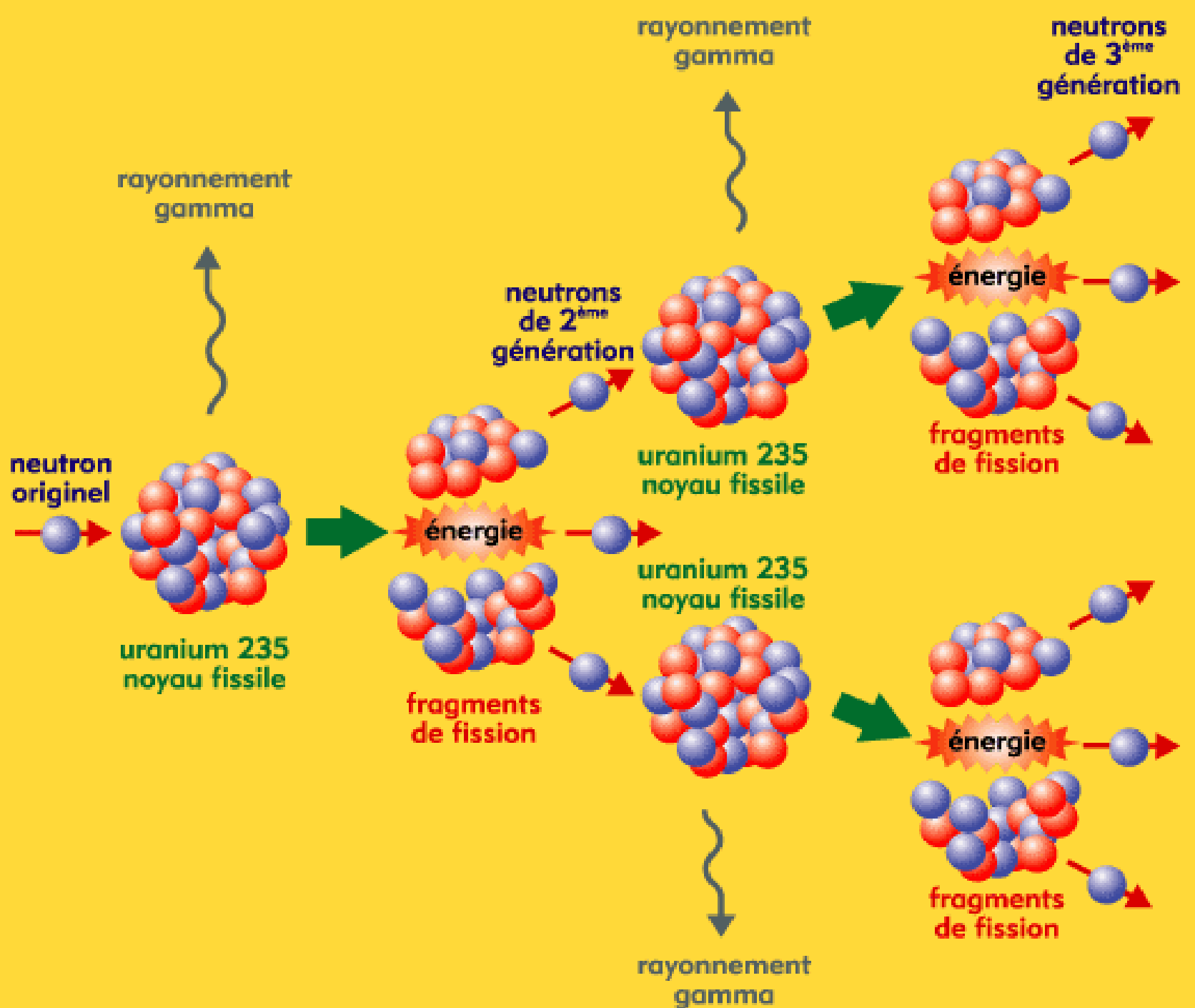
☀ Les **produits de fission**, moins lourds, ont une énergie de liaison plus forte par nucléon (leur masse globale est plus faible).

La fission s'accompagne donc d'une **libération d'énergie**.

☀ Le **neutron** est un projectile idéal parce qu'électriquement neutre et sensible aux forces intranucléaires (*liaisons fortes*).

☀ La fission que le neutron provoque dans certains nucléides peut libérer plus d'un neutron, ouvrant la voie à une **réaction en chaîne**.





7. Quelle utilisation de la fission nucléaire ?



« **Péché originel** » : utilisation militaire sous forme de bombes...
Hiroshima et Nagasaki : 240 000 morts, 120 000 « survivants »...



Réacteurs nucléaires :

- Dans les années 1940, les « piles atomiques » furent conçues afin de produire le plutonium nécessaire aux bombes
- Leur utilisation « civile » pour produire de l'électricité date des années 1950 (parallèlement, les militaires récupéraient le plutonium).
L'énergie produite est récupérée sous forme de chaleur dans la chaudière d'une machine à vapeur. La détente dans des turbines de la vapeur produite fait tourner des alternateurs (sorte de dynamos), produisant ainsi l'électricité.



Il existe 450 réacteurs civils dans le monde, dont 60 en France (13%).

II. Radioactivité et risques sanitaires

1. Evaluation des risques sanitaires
2. Prévention des risques sanitaires
3. Rejets de produits radioactifs dans la biosphère

1. Evaluation des risques sanitaires

- ❑ Un élément radioactif est susceptible de communiquer une certaine **quantité d'énergie** à des êtres vivants : la « **dose absorbée** » qui s'exprime en **gray** ($1 \text{ Gy} = 1 \text{ Joule} \cdot \text{kg}^{-1}$).

- ❑ Une « **dose équivalente** » est exprimée en **sievert** (Sv), égale au produit de la dose absorbée moyenne dans l'organe, ou dans le tissu par un facteur de pondération qui tient compte de la **nature du rayonnement** (photons, électrons, neutrons, alpha,...).

- ❑ En tenant compte de l'**effet biologique** lié :
 - aux zones du corps irradié ;
 - à la nature et à l'énergie du rayonnement (α , β , γ , n...) ;
 - à l'activité **incorporée** dans l'organisme (en Bq) ;une « **dose efficace** » peut également être exprimée en **sievert** (Sv) ;

❑ De nombreuses contaminations radioactives *cancérogènes* ont été observées avant l'édiction de règles de radioprotection (depuis Marie ou Irène Curie jusqu'aux ouvrières des industries horlogères...)

❑ Les connaissances sur la nature des *risques* cancérogènes des radiations sont d'abord fondées sur la surveillance des 120.000 survivants d'Hiroshima et de Nagasaki : entre 1950 et 1990 une surmortalité par cancer de 5% a pu y être observée...

❑ Des effets *cancérogènes* sont notables au dessus de **0,1 Sv** pour une irradiation aiguë ($>0,5$ Gy), de **0,5 Sv** pour une irradiation prolongée.

❑ La dose de **5 Sv** est dite *létale* (50% de décès dans la population contaminée dans les mois qui suivent). Au delà, la mort est encore plus rapide...

❑ En Europe, la dose annuelle moyenne à laquelle la population est exposée, essentiellement due à la **radioactivité naturelle** (celle du radon surtout), est environ de **4 mSv** par personne.

2. Prévention des risques sanitaires

A) Un risque mineur longtemps négligé : la **radioactivité naturelle**

Rayonnements du cosmos, du sol, de l'air (radon)...

Danger principal : le radon (en France, environ 1,3 mSv par an)

Gaz noble produit en permanence par la désintégration α du radium. Instable, il se désintègre lui-même par la voie α (son temps de demi-vie est de 3,8 jours) .

Ainsi que l'ont montrée des études épidémiologiques sur les mineurs dans les mines d'uranium, une exposition trop importante au radon accroît le risque de ***cancer du poumon***.

Remèdes :

aérer et ventiler les maisons, les sous-sols et les vides sanitaires... (et peut-être aussi ne pas fumer : un paquet équivaut à multiplier la dose de radon par 15 !)

B) Un risque majeur potentiel : la **radioactivité artificielle**

Deux objectifs doivent donc être poursuivis *a minima* :

- a) Eviter les **irradiations aiguës** liées aux accidents ou à la concentration de radionucléides dans l'environnement
 - dilution dans l'environnement
 - concentration et conditionnement dans des lieux isolés

- b) Empêcher l'**incorporation** dans l'organisme des radioéléments :
 - iode dans la thyroïde ;
 - strontium dans le squelette ;
 - actinides dans le foie et le squelette ;
 - tritium ou carbone dans l'ensemble du corps...

qui, outre leurs éventuels aspects toxiques du point de vue chimique, génèrent par leur activité des modifications biologiques cancérogènes.

3. Rejets de produits radioactifs dans la biosphère

Des contaminations nombreuses, d'ampleurs diverses :

- a) Liés à l'exploitation et à l'**entreposage** sans précaution de matières radioactives (URSS [Sibérie] : Mayak, Tomsk-7, Krasnoyarsk-26 ; USA [Washington] : Site de Hanford ; Brésil: Goïana)
- b) Liés aux **utilisations militaires** : essais nucléaires en atmosphère libre, utilisation de matières radioactives (USA [Irak] - 1991), sous-marins nucléaires coulés ou abandonnés (Russie [Mourmansk] - 1998)
- c) Liés à une **réaction en chaîne incontrôlée** ou à une **explosion** dans un **réacteur** : Three Mile Island (USA - 1979), Tchernobyl (URSS - 1986)
- d) Liés à des **accidents de criticité** : Mayak (URSS - 1957), Tokai Mura (Japon - 1999)

Activités relâchées en Pbq (10^{15} becquerels)

	<i>Tchernobyl</i>	<i>Windscale</i>	<i>Three Mile Island</i>	<i>Mayak</i>	<i>Goiana</i>	<i>Essais nucléaires</i>
Césium-137	85	0,04	?	0,03	0,05	1500
Césium-134	54	0,001	?	?		< 1,5
Strontium-90	10	0,00022	?	4		1300
Iode-131	1760	0,75	0,001	?		780 000

Surfaces en km²

	<i>Tchernobyl</i>	<i>Windscale</i>	<i>Three Mile Island</i>	<i>Mayak</i>	<i>Goiana</i>	<i>Essais nucléaires</i>
Evacuées	3000	0	(*)	1000	0	
Affectées	28000			15 000	<1	Monde entier

1 becquerel (Bq) = une désintégration nucléaire par seconde
 1 petabecquerel (PBq) = 10^{15} Bq

Quels remèdes après un rejet (civil ou militaire) ?

- a) **Mise à l'abri** (consignation à domicile) pendant les heures les plus critiques : évite l'**irradiation externe** due à la source et les dépôts au sol, l'**inhalation** de molécules radioactives, la **contamination** de la peau et des vêtements (Tokai Mura, 1999)
- b) **Evacuation** provisoire de la population (Three Mile Island, 1979)
- c) **Déplacement** définitif des populations avoisinantes avec zone d'exclusion : évite l'irradiation externe à long terme due aux dépôts au sol et l'inhalation de poussières radioactives en suspension (Tchernobyl, 1986)
- d) **Administration de pilules d'iodure de potassium stable** : protège contre l'ingestion d'iode radioactif ^{131}I .
- e) **Contrôle** de la chaîne agricole alimentaire après le rejet.

III. Risques de l'industrie nucléaire

1. Principes de prévention des risques nucléaires
2. Accident de réactivité (réacteurs)
3. Accident de criticité (industrie)
4. Puissance radioactive après arrêt d'un réacteur

1. Principes de prévention des risques nucléaires

Prévenir le risque nucléaire dans l'industrie civile ?

Dans le cadre du fonctionnement de l'industrie nucléaire :

- Etablissement de **normes** et doses limites (pour le personnel)
- Etudes **probabilistes** des risques et **règles de sûreté**
- **Multiplication** des « remparts » de protection

limitations :

- *les normes de dose sont évolutives et fondées sur les seules études épidémiologiques des risques sanitaires.*
- *une probabilité même infime n'est jamais nulle, alors que le risque est souvent très important*
- *contradiction entre sûreté et rentabilité.*

Multiplication des barrières :

Exemple du réacteur à eau pressurisée REP/PWR

Concept de « défense en profondeur » : chaque dispositif doit a priori être considéré comme vulnérable et protégé par un autre dispositif...

⇒ Création de *barrières* entre le combustible nucléaire et l'extérieur :

- a) gaine métallique du combustible (264 « crayons » renfermant en tout 15 millions de pastilles de combustibles)
- b) enveloppe du circuit de refroidissement (cuve)
- c) enceinte (éventuellement double) de confinement en béton

❑ Il n'y avait pas d'enceinte de confinement dans le réacteur accidenté de Tchernobyl...

❑ L'enceinte d'un REP est conçue pour résister à la chute d'un avion de tourisme et un tremblement de terre de magnitude 7. Mais pas plus...

Coupe d'un REP

Circuit primaire :

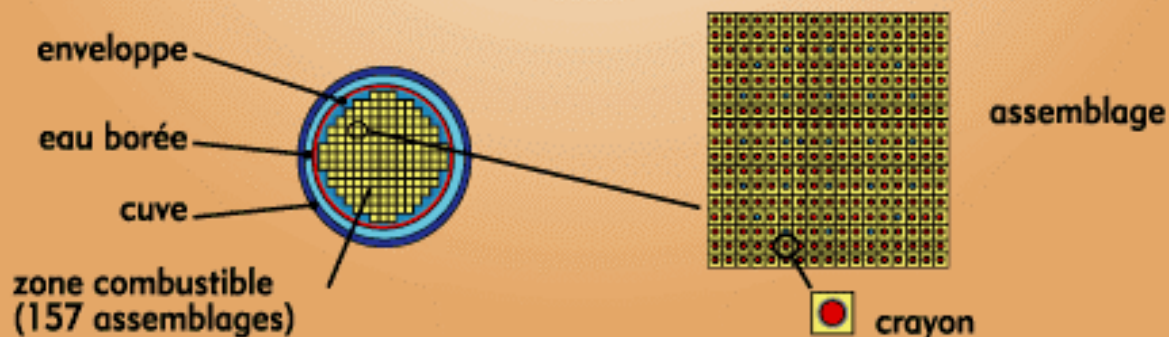
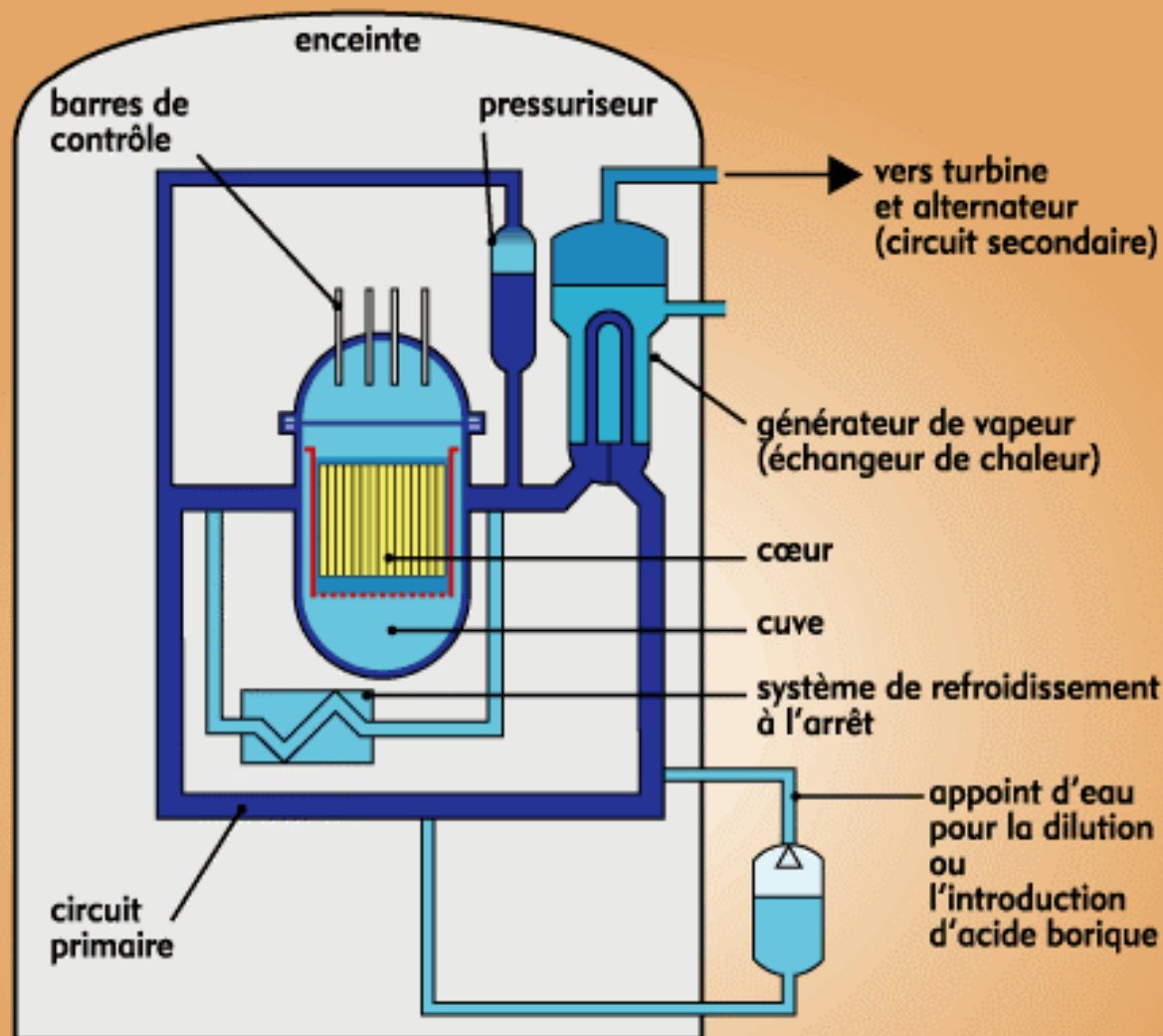
Eau sous pression (155b)

Caloporteur+modérateur
(ralentisseur de neutron)

Températures de l'eau
primaire : 290 à 330°C

Poisons neutroniques :

- Barres de contrôle
- Acide borique



2. Accidents de réactivité (fission)

➤ Dans un réacteur en fonctionnement, une réaction en chaîne est «*stabilisée*».

Le nombre de neutrons thermiques produit par des réactions de fission et produisant de nouvelles fissions doit rester stable.

➤ Une « divergence incontrôlée » intervient si le nombre de neutrons et de fissions augmente sans *contre-réaction*.

➤ C'est ce qui s'est produit avec le RMBK Tchernobyl :

-une succession d'erreurs humaines graves a permis le déclenchement d'une réaction en chaîne incontrôlée ;

-par conception le réacteur RMBK est instable, or les barres de contrôle se sont révélées insuffisantes ;

-le réacteur a fini par exploser et prendre feu.

➤ **Dans un réacteur REP**, l'eau du circuit primaire est à la fois :

- modérateur (ralentit les neutrons de façon à leur permettre de déclencher des réactions de fission) ;
- caloporteur (transfère la chaleur vers le circuit secondaire).

Si la réaction s'emballe, la température monte, l'eau devient moins dense et ralentit moins les neutrons, la réaction ralentit...

Le REP est stable par conception. L'accident de Tchernobyl, tel qu'il s'est produit, n'y est pas possible...

➤ Pour autant, d'autres accidents peuvent survenir !

- A Three Mile Island (REP), la défaillance d'une vanne du circuit primaire a mis fin au refroidissement du cœur, entraînant la **fusion** d'une partie du combustible. Heureusement, l'enceinte de sécurité (et même la cuve) a joué son rôle.

- L'accident de fusion du cœur, même hautement improbable, reste possible...

3. Accidents de criticité

❑ En dehors des réacteurs, la réaction en chaîne doit être **évitée**.

Il faut donc empêcher que des neutrons spontanément produits par désintégration radioactive enclenchent une réaction en chaîne.

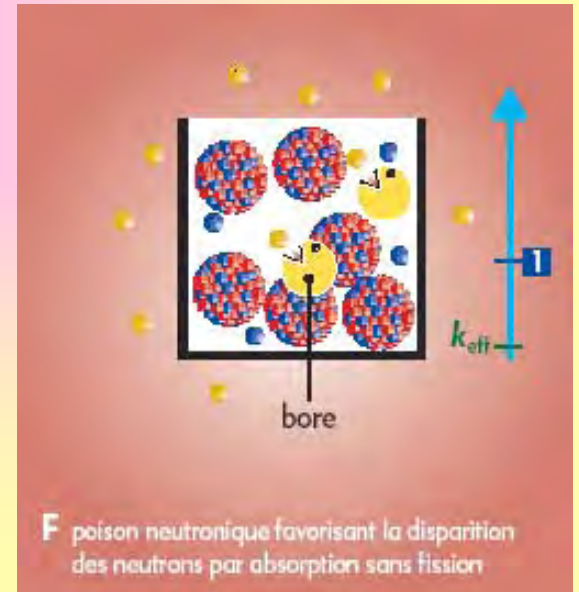
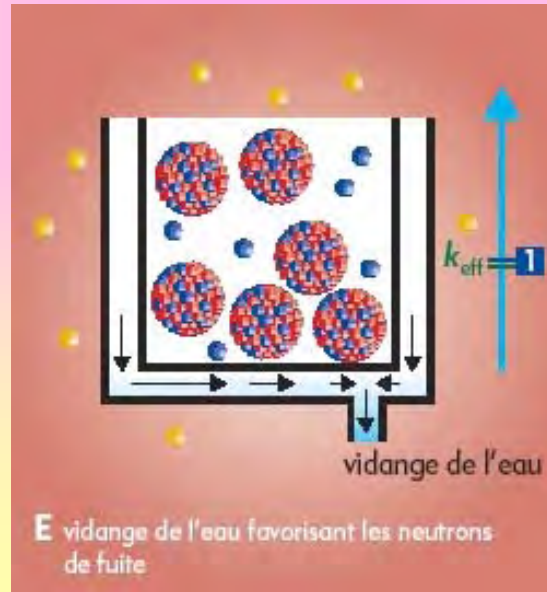
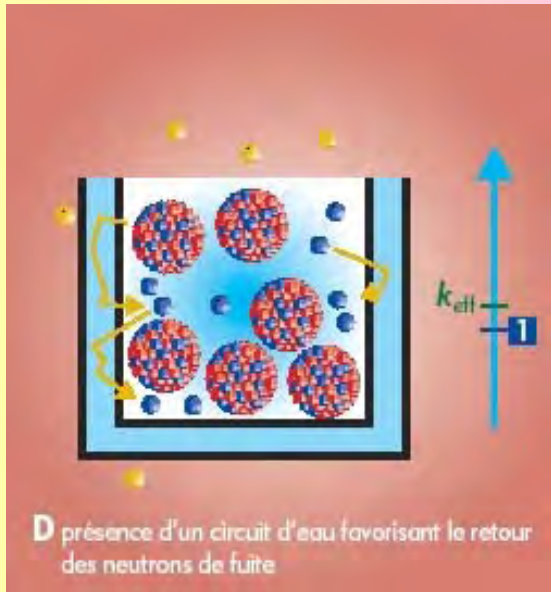
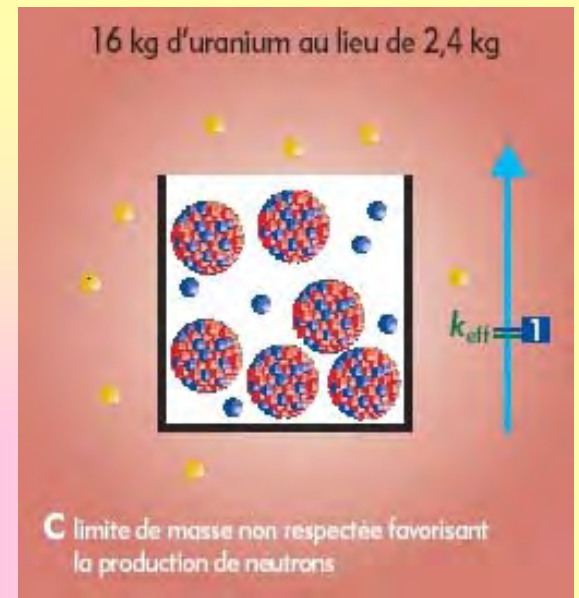
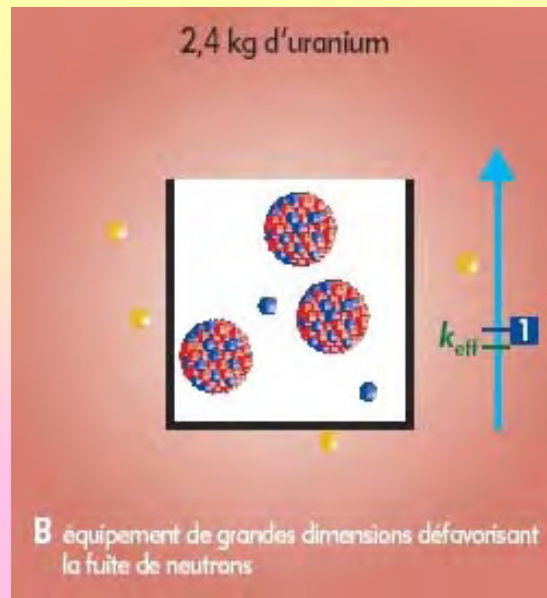
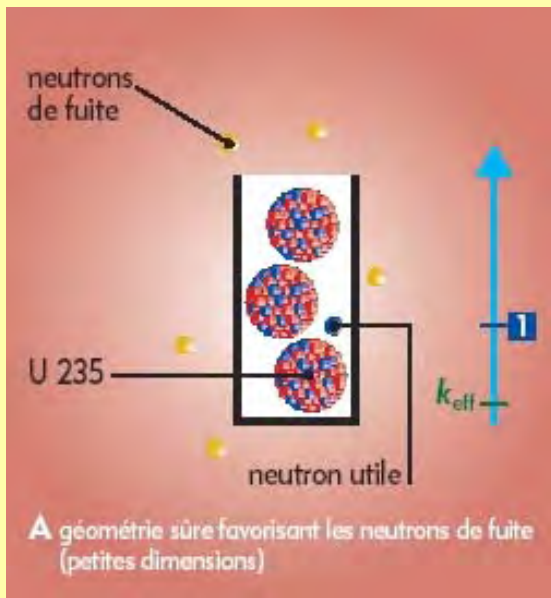
❑ Un matériau radioactif doit être stocké ou manipulé :

→ dans des conteneurs aux formes adaptées (permettant aux neutrons de quitter le milieu) ;

→ en quantités suffisamment faibles (relativement à sa nature).

❑ Pour des raisons de **recherche de rentabilité**, ces deux conditions n'ont pas été respectées à **Tokai Mura** (Japon) en 1999, provoquant une réaction incontrôlée (surcritique).

⇒ irradiation mortelle de deux ouvriers, irradiation grave d'un troisième, 133 autres irradiés (pompiers, ouvriers...)



4. Puissance radioactive après arrêt d'un réacteur

- Pendant le fonctionnement des réacteurs, ce sont les réactions de fission qui fournissent l'essentiel de l'énergie thermique. Les désintégrations radioactives y contribuent **relativement** peu.
- Après l'arrêt, les réactions de **désintégration radioactive** continuent, sans pouvoir quant à elles être arrêtées... Sous peine de détérioration des enveloppes, il faut :
 - continuer à assurer l'évacuation de la chaleur du réacteur à l'arrêt ;
 - après déchargement du combustible, continuer à le refroidir.
- Les « déchets » issus du réacteur doivent donc :
 - d'abord être stockés dans une piscine de refroidissement ;
 - être gérés...

IV. Déchets de l'industrie nucléaire

1. La loi Bataille de 1991
2. Trier les déchets
3. Transformer ? La transmutation.
4. Conditionner, entreposer et stocker ?

1. La loi Bataille de 1991

❑ En 1991, il a été voté de surseoir jusqu'en 2006 à toute décision définitive en ce qui concerne les déchets nucléaires.

❑ Trois axes de recherche ont alors été définis :

- solutions permettant la séparation et la transmutation des éléments radioactifs à vie longue (CEA) ;
- étude des possibilités de stockage réversible et irréversible dans les formations géologiques profondes (ANDRA) ;
- étude des procédés de conditionnement et d'entreposage de longue durée en surface des déchets radioactifs à vie longue et à haute activité.

Les isotopes radioactifs produits par l'industrie nucléaire

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

lanthanides

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

actinides

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

2. Trier les déchets

- ❖ En France, environ 1 kg de déchets nucléaires est produit par an et par habitant, dont 20g de déchets très actifs.
- ❖ Le « tri sélectif » de ces déchets est d'abord nécessité par le traitement différent qui doit être apporté aux :
 - Déchets de très faible activité (TFA, issus du démantèlement des installations nucléaires) ;
 - **Catégorie A** : déchets de faible activité, *a priori* négligeable au bout de 300 ans ;
 - **Catégorie B** : déchets de moyenne activité et de périodes supérieures à 30 ans.
 - **Catégorie C** : déchets de haute activité et de longues périodes.

❖ **Catégorie A** : actuellement stockés en surface, ils proviennent des installations et de l'équipement (gants, filtres, etc.). Ils représentent 90% du volume des déchets et devraient, en France, atteindre un volume de 500 000 m³ en 2020.

*Le seul traitement pour ces émetteurs β et γ est le **temps** : ils doivent avoir une activité inférieure à 370 Bq/g après 300 ans.*

❖ **Catégorie B** : contiennent des actinides émetteurs α et γ . Issus de usines de fabrication et de retraitement du combustible, restes de structures ayant contenu du combustible, etc.

Ils ne dégagent pas une énergie thermique importante, et sont provisoirement entreposés. 60 000 m³ en 2020.

Et le combustible utilisé ?

En France, il est traité à l'usine de La Hague, par le procédé hydrométallurgique « PUREX » qui permet d'extraire 99,9% de l'uranium et du plutonium restants (composants du combustible mixte MOX).



Ce qui reste constitue la :

Catégorie C : produits de fission émetteurs α , β , γ , issus du traitement des combustibles usés.

Actuellement vitrifiés et provisoirement entreposés, ils occuperont 5000 m³ en 2020. Au moins 10.000 ans sont nécessaires avant qu'ils retrouvent l'activité du minerai d'origine.

3. Transformer ? La transmutation

□ La procédure de tri effectuée par PUREX (récupérant l'uranium et le plutonium) pourrait être étendue. D'autres procédés chimiques sont possibles pour séparer et récupérer les actinides mineurs et autres produits à vie longue :

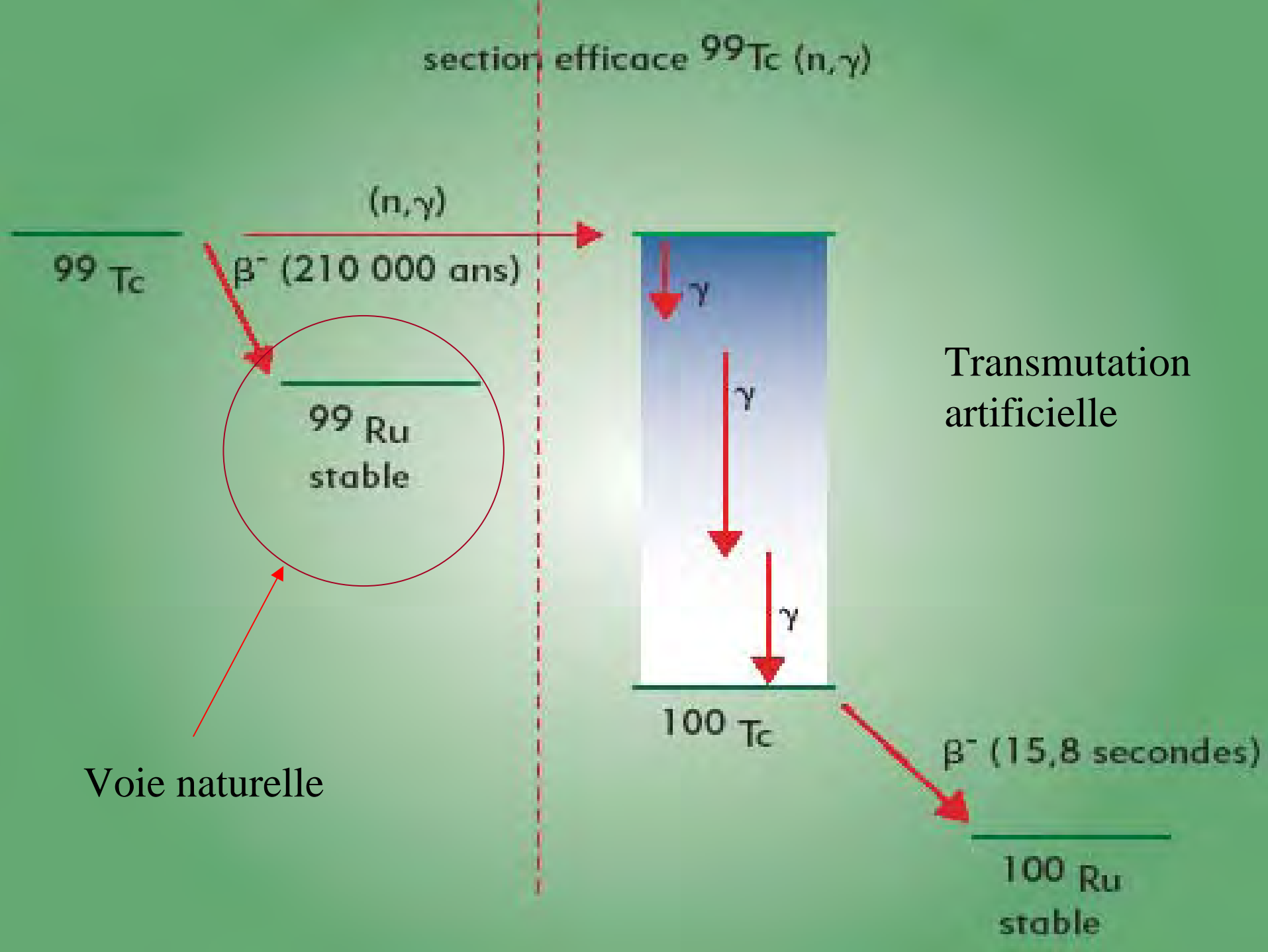
→ soit en vue d'un stockage adapté à l'activité et à la durée de vie des nucléides ;

→ soit en vue de leur **transmutation**, c'est à dire de leur transformation en éléments stables ou peu actifs.

□ Si certaines transmutations « utiles » apparaissent théoriquement possibles et réalisables en pratique (exemple du technétium 99), ce n'est pas forcément toujours le cas :

→ exemple encore indéterminé de l'actinide mineur le plus courant, l'**américium 241**, fortement radiotoxique et de période 432 ans...

section efficace $^{99}\text{Tc} (n, \gamma)$



^{99}Tc

β^- (210 000 ans)

^{99}Ru
stable

Voie naturelle

(n, γ)

γ

γ

γ

^{100}Tc

Transmutation
artificielle

β^- (15,8 secondes)

^{100}Ru
stable

4. Conditionner, entreposer et stocker ?

A) Conditionner

❑ Les déchets B sont généralement intégrés à des matrices en bitume ou béton. Mais la résistance du béton à la dégradation par l'eau ne dépasse quelques milliers d'années.

Des recherches se poursuivent au CEA pour concevoir un conteneur universel adapté à ce type de déchets.

❑ Les déchets C sont confinés dans des matrices en verre très résistantes, censées résister à la dégradation au cours de centaines de milliers d'années.

❑ L'objectif est donc de conditionner en vue d'un stockage en surface ou en profondeur de très longue durée, jusqu'à ce que l'activité redescende en dessous de la radioactivité naturelle.

⇒ risques pour les sociétés humaines du futur.

B) Entreposer

□ L'entreposage est effectué en surface, dans des installations adaptées et surveillées...

En situation « normale » l'entreposage n'a donc pas d'impact immédiat sur l'environnement, mais :

→ Les déchets sont souvent là pour des milliers d'années, alors que rien ne garantit la pérennité de leur surveillance.

→ Les actes de malveillance ou des catastrophes accidentelles (chute d'un avion, d'un météore...) peuvent provoquer la dispersion des nucléides.

→ L'entreposage en surface ou faible profondeur n'utilise pas de barrière géologique susceptible de protéger l'environnement.

⇒ L'entreposage ne paraît vraiment adapté que pour les déchets à faible durée de vie.

C) Stocker en profondeur

- ❑ **Objectif** : stocker les déchets à l'abri de la biosphère jusqu'à ce que leur radioactivité ait décru en deçà de la radioactivité naturelle.
- ❑ *Selon le scénario actuel du CEA :*
 - a) Les 1000 premières années, les déchets de haute activité chaufferaient la roche (jusqu'à 100°C). Mais ensuite, celle-ci se gorgerait peu à peu d'eau en même temps que des fissures apparaîtraient dans les ouvrages souterrains.
 - b) Au bout de 10 000 ans les premiers nucléides commenceraient à migrer à partir de leurs conteneurs dégradés.
 - c) Dans des formations géologiques peu perméables, la remontée des nucléides pourrait prendre des millions d'années. Parvenus en surface, ils seraient donc devenus très peu actifs.

première phase

A



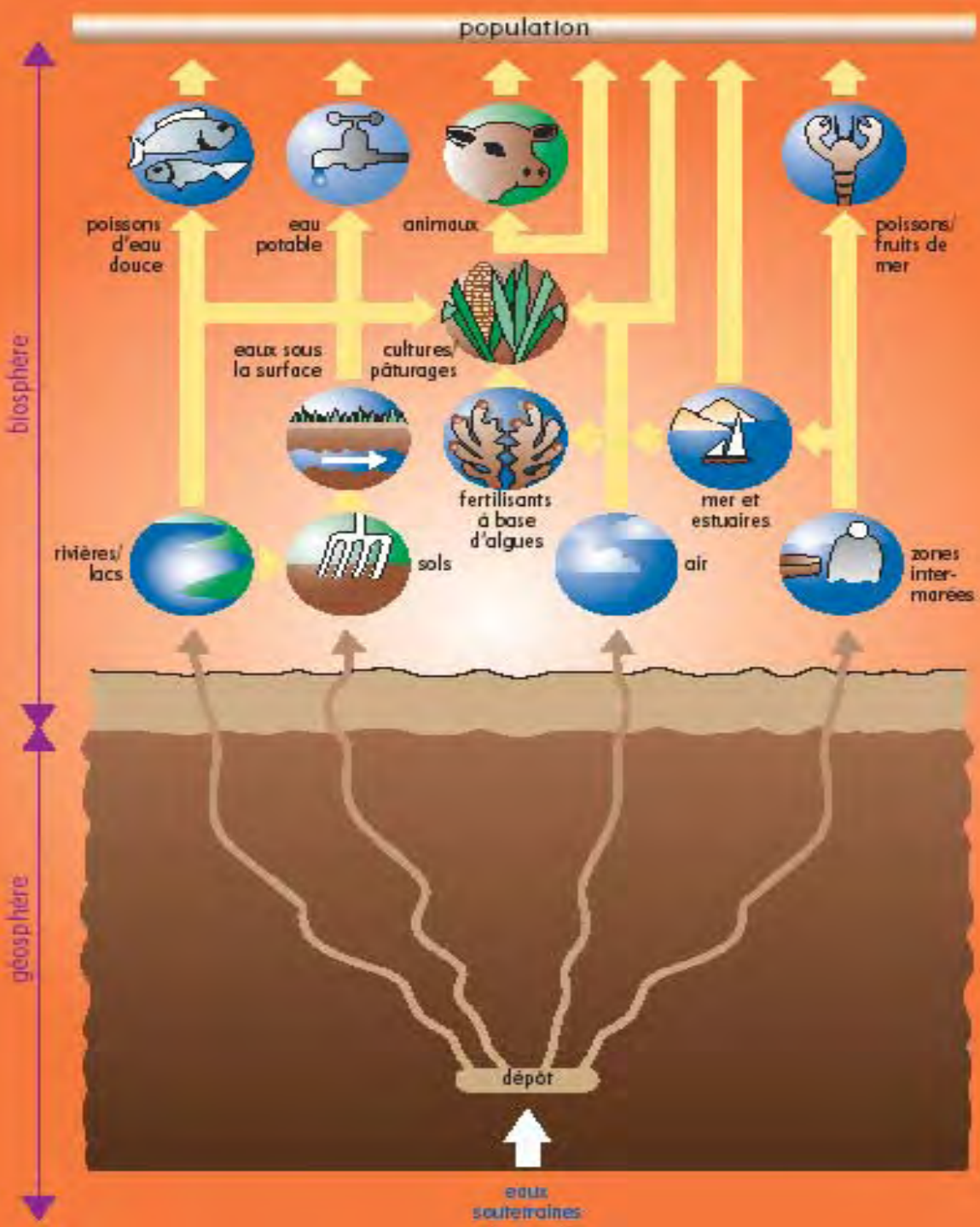
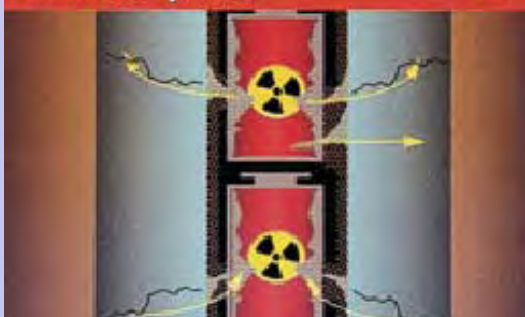
deuxième phase

B



troisième phase

C



Des objections nombreuses :

- ❑ Problème de la réversibilité du stockage (délimitée dans le temps ou « éternelle »).
 - ❑ Pas de garantie absolue contre l'accident « humain » dans le futur : involontaire (forage d'un puits profond) ou volontaire.
 - ❑ Question de l'évolution géologique future (*a minima*, entreposer dans des plaines afin d'éviter l'érosion).
 - ❑ Question des séismes inévitables pendant d'aussi longues périodes (*a minima* choisir une zone non sismique !)
 - ❑ Question de la nature du sous-sol (salin, argileux ou granitique) et de ses éventuelles fissures (expériences de Bure)
- ⇒ L'ensemble de ces objections ou questions doit être pris en compte avant toute décision publique de stockage profond.

V. Conclusion :

Au delà de la science, un choix politique

1. Vers un renouvellement du parc nucléaire ?
2. Solution alternative : la sortie
3. Un choix citoyen nécessaire

1. Vers un renouvellement du parc nucléaire ?

Un nouveau réacteur « évolutionnaire » : l'EPR ?

- Le « *European pressurized reactor* » est de « 3^{ème} génération », plus performant mais de conception identique au REP.
- Son rendement serait meilleur, il utiliserait du MOX (combustible retraité riche en plutonium) et produirait moins de déchets (-10%).
- Prévu pour durer 60 ans (REP actuels : 40 ans), il améliorerait selon ses constructeurs (Framatome-Areva et Siemens) les objectifs de sûreté d'un facteur 10 (en revanche les accidents éventuels seraient plus dangereux).
- Son enceinte serait capable de résister à la chute d'un avion militaire (mais toujours pas d'un airbus !)
- Ses enjeux économiques, politiques et sociaux sont importants.

2. Solution alternative : la sortie

Sortie (nécessairement **progressive**) du nucléaire

limitations et conditions :

- *contribution à l'effet de serre des énergies fossiles*
(en ce qui concerne le secteur de production de l'électricité)
 - *nécessité d'énergies renouvelables de remplacement*
(éoliennes, hydraulique, biomasse, photovoltaïque, géothermie...)
 - *nécessité d'économies sur la consommation (« négawatts »)*
- ...et gestion du « stock » nucléaire accumulé !**

3. Un choix politique nécessaire

Un véritable débat démocratique doit mettre en avant :

- un **engagement** de toutes et tous vis à vis des générations futures, en particulier sur la question des déchets ;
- la définition d'une **loi** sur l'utilisation de l'énergie nucléaire, son contrôle et les garanties de sûreté ;
- une évaluation des **potentiels** de danger qui ne se limite pas à une approche purement probabiliste (écartant *de facto* les événements très peu probables) ;
- une réflexion sur la capacité d'opérateurs privés du secteur concurrentiel à assumer une nécessaire **sûreté** en même temps que leur recherche de profits...

Bibliographie sommaire

- Relativité restreinte et structure atomique de la matière, C. Grossetête, Ellipses (Paris, 1985)
- Clefs, n°45 : *Physique nucléaire et sûreté* (revue du Commissariat à l'Energie Atomique [CEA], 2001)
- Clefs, n°46 : *Les recherches pour la gestion des déchets nucléaires* (CEA, 2002)
- Cahiers de Global Chance, n°18, *Le réacteur nucléaire EPR, un projet inutile et dangereux*, janvier 2004
- Quelques sites internet intéressants :
 - <http://www.laradioactivite.com/> (CNRS/EDP Sciences)
 - <http://www.cea.fr/> (Commissariat à l'énergie atomique)
 - <http://www.sortirdunucleaire.org/> (Sortir du nucléaire)