

«Gestion et recyclage des déchets nucléaires»

Etienne VERNAZ

Ancien Professeur INSTN

Ancien Directeur de Recherche au CEA

etienne.vernaz@wanadoo.fr

Première partie : la radioactivité

La radioactivité fait peur ; présente partout mais invisible nous en subissons tous les effets.

Est-ce grave ?

✚ Qu'est la radioactivité ?

✚ Quelles sont les doses de rayonnement d'origine naturelle et artificielle auxquelles nous sommes exposés ?

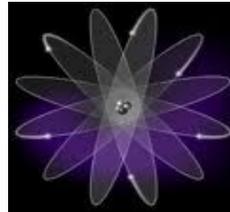
✚ Quel est leur impact sur notre santé ?

La matière est constituée d'atomes

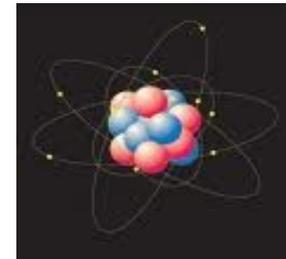
Un atome comprend un noyau et un ou des électrons



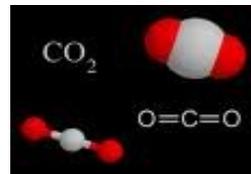
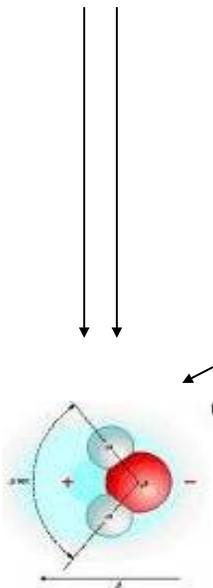
Hydrogène
Masse 1



Carbone
Masse 12



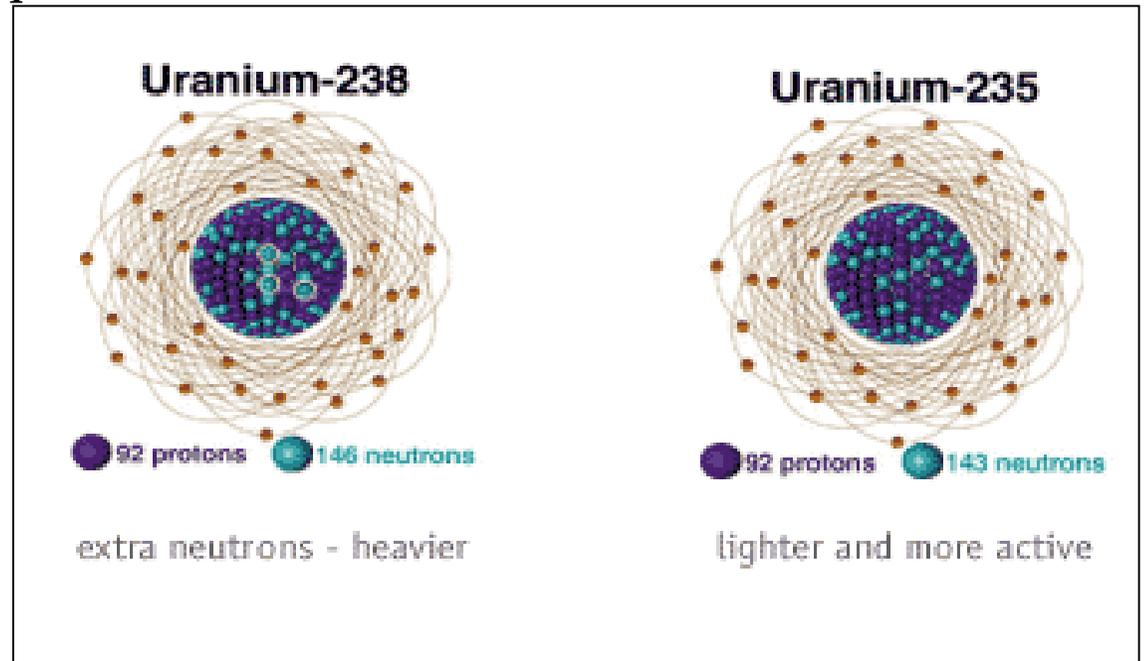
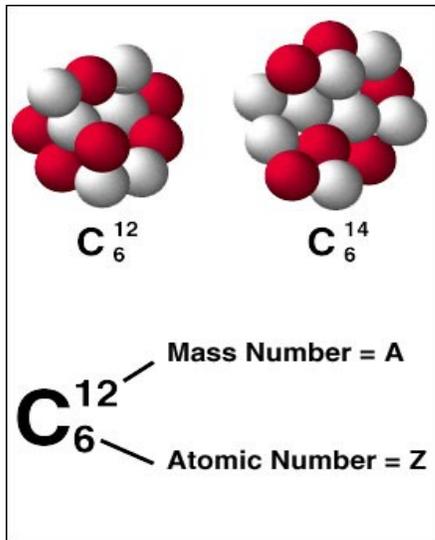
Oxygène
Masse 16



La biomasse séchée
 $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$

Certains noyaux ne sont pas stables

Ils se désintègrent spontanément en émettant un rayonnement α , β ou γ :
on dit qu'ils sont **radioactifs**.



Deux isotopes du carbone :

- **Le C^{12} (stable)**
- **Le C^{14} (Radioactif)**

Deux isotopes de l'Uranium :

- **L'U 235 (fissile)**
- **L'U 238 (fertile)**

La radioactivité naturelle au quotidien

La radioactivité se mesure en Becquerel ;
1 Bq = 1 désintégration par seconde

Quelques ordres de grandeurs :

Eau de mer : 14 Bq / litre

Corps humain : 120 Bq / kg

Pomme de terre : 150 Bq / kg

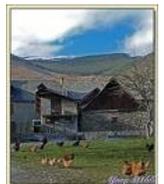
Sol granitique : 8 000 Bq / kg

L'air que nous respirons (dans les habitations) ~ 90 Bq/m³

(de 10 à 400 Bq/m³ à cause du radon fortement dépendant de la nature du sous-sol, mais aussi du temps, du mode de vie, etc.)

80 m³ de terre dans un terrain cristallin (granite, schiste...) : 1 000 000 000 Bq

La radioactivité naturelle au quotidien



Les rayonnements ionisants

- Les éléments radioactifs, qu'ils soient naturels ou artificiels, émettent des rayonnements de différents types (α , β , γ)
- C'est également le cas des générateurs de RX, des accélérateurs de particules, etc.
- Tout comme le rayonnement du soleil, ces rayonnements vont interagir avec la matière rencontrée en provoquant des ionisations :

ils sont appelés rayonnements ionisants.

L'effet du rayonnement sur la santé

- Être exposé à la radioactivité naturelle ou artificielle, est-ce différent ? NON !
- Peu importe la source ce qui compte avant tout c'est l'énergie que l'on en reçoit et donc la dose absorbée!
 - La dose absorbée se mesure en Gray ($1 \text{ Gy} = 1 \text{ J / kg}$)

Les effets d'une même dose absorbée sur la matière vivante vont dépendre, non seulement du type de rayonnement mais aussi du métabolisme vis-à-vis de l'élément.

On parlera alors de dose efficace exprimée en sieverts (Sv), ou plus généralement en millisieverts (mSv) pour exprimer les effets potentiels à long terme du rayonnement !

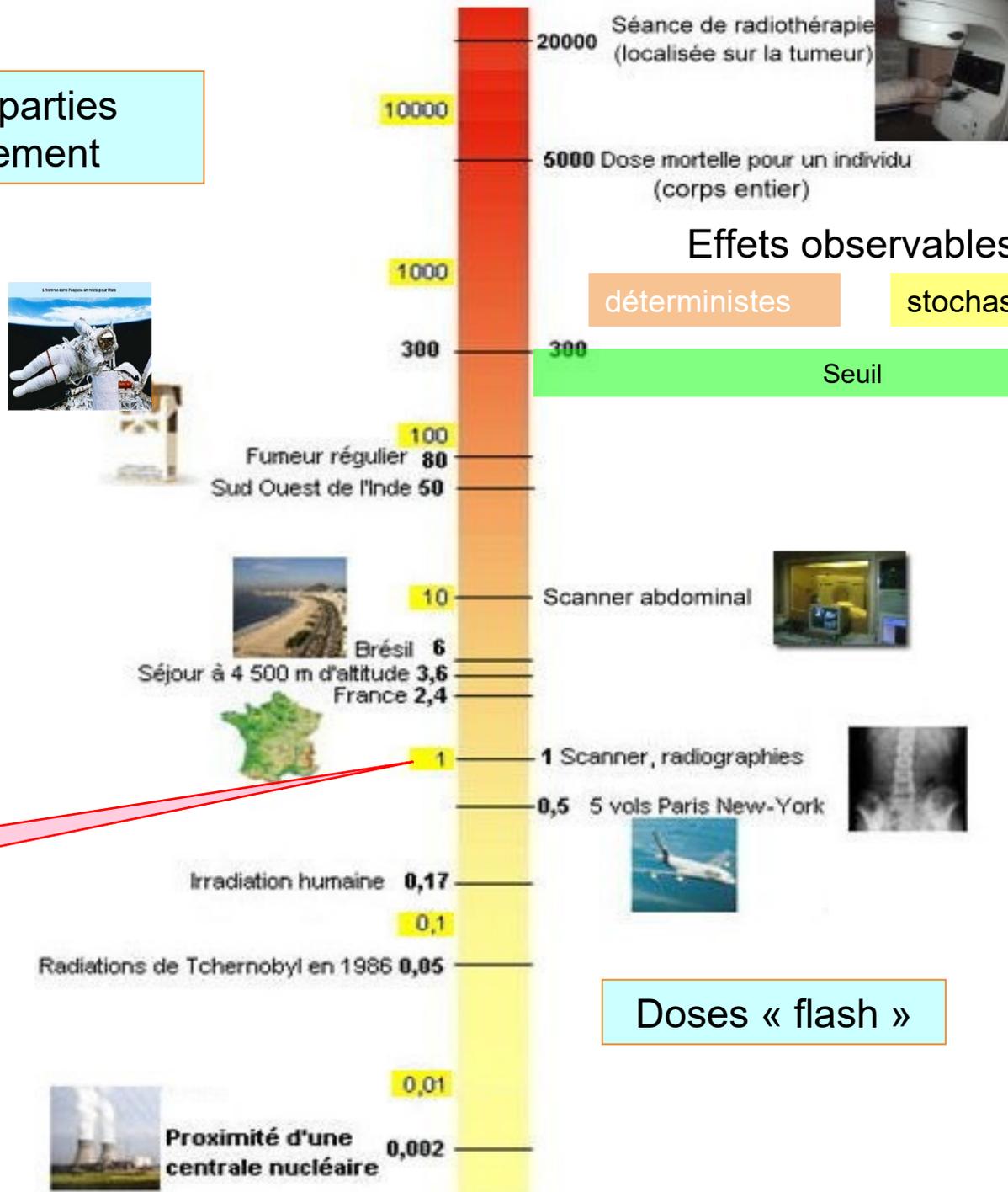
NB - Anciennes unités le Rad ($1 \text{ Gray} = 100 \text{ Rad}$) et le Rem ($1 \text{ Sievert} = 100 \text{ Rem}$)

Doses réparties
régulièrement

Vie dans l'espace

Échelle de dose (mSv)

Réglementation pour le public



déterministes

stochastiques

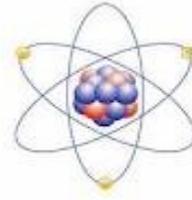
Seuil

Doses « flash »

Les doses naturelles varient assez largement selon les régions de la planète

Sources	Dose Moyenne en France	<u>Variations selon les régions</u>
cosmos	0,41	x 2 à 1500 m d'altitude
tellurique	0,46	De 0,3 à 100 mSv
radon	1,30	De 0,2 à 100 mSv
organisme	0,23	0.23 stable
Total	2,4 mSv	De 1 à 10 (max 400 mSv !)

Comparaison des doses naturelles et artificielles reçues en France



Artificielle



- Médical : 1,3
- Militaires : 0,02
- Industrie nucléaire française: 0,008
- Tchernobyl : 0,002

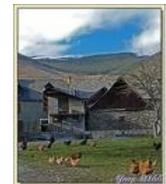


Total : 1,3 mSv/ an

Naturelle

- Radon : 1.30
- Cosmos : 0.41
- Tellurique : 0.46
- Organisme : 0.23

Total : 2.4 mSv /an



Connaissance des effets sur la santé

Après 100 ans d'études, les scientifiques en savent plus sur les effets sanitaires de la radioactivité que de la plupart des agents physiques et chimiques utilisés dans l'industrie ou l'agriculture !

(SFRP « La radioactivité dans l'environnement » UNSCEAR)

Résumé de l'état des connaissances actuelles sur l'effets des rayonnements sur la santé

- **De 0 à 100 mSv, aucun effet sur la santé n'est observable**
- **De 100 à 800 mSV on observe des effets dit stochastiques** (augmentation de la probabilité d'occurrence d'un cancer qui croit de manière proportionnelle à la dose)
- **De 800 à 8000 mSv on observe des effets déterministes** (c'est-à-dire certains) commençant par des nausées et étant mortel à 8000 mSV (la DL50, dose à laquelle 50% de la population exposée meurt est de 4500 mSv).

<http://www.academie-sciences.fr/activite/rapport/rapport070405.pdf>

- Depuis plus de 50 ans, appliquant le principe de précaution avant l'heure, les autorités de sûreté nucléaire des pays occidentaux ont pris de très grandes marges, imposant de ne pas dépasser **1mSv/ an** pour l'exposition de l'ensemble du public et **20 mSv/an** pour les travailleurs du nucléaire.

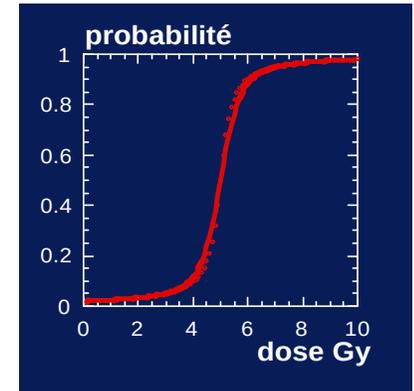
Effet stochastiques des doses moyennes : de 100 à 1000 millisievert

Le suivi de grandes populations ayant subi une dose largement supérieure à l'irradiation naturelle permet d'avoir un bon retour d'expérience sur les effets aléatoires. C'est notamment le cas pour les populations d'Hiroshima et Nagasaki,

- Parmi les 86 500 survivants de Hiroshima et Nagasaki, médicalement suivi depuis 40 ans, 7827 sont morts de cancer. Pour une population témoin de 86 500 japonais non soumise à radiation on attend statistiquement environ 7400 morts par cancer. L'excès est ici significatif mais ne représente que **421 cas supplémentaires sur 40 ans**. Ce donc n'est pas l'hécatombe que la plupart imagine.
- **Aucun effet héréditaire** radio-induit n'est observé parmi les descendant des populations survivantes d' Hiroshima et Nagasaki, ni sur les liquidateurs de Tchernobyl (Source : Professeur Aurengo)
- **Si on suppose que 100 personnes sont irradiés à 200 mSv, en appliquant la valeur de $5 \cdot 10^{-5}$ décès par mSv et par an (CIPR n°60), on obtient un excès de cancer de 1 cas**

Effet des fortes doses au delà de 1000 milliSievert

- Les fortes doses ça tue (DL50 = 4.5 Gy ; létal à 100% à 8 Gy*) !
 - C'est pour cette raison qu'elles sont utilisées en radiothérapie pour tuer les cellules cancéreuses
 - C'est aussi pour cette raison que l'on peut utiliser les rayonnements ionisants pour stériliser en tuant les bactéries
- Irradiations médicales :
 - Pour éradiquer des tumeurs de très fortes doses sont délivrées à environ 200 000 personnes par an en France
 - Plus de 50 000 vies sauvées par an !
 - Le suivi de cette large population permet de bien appréhender l'effet cancérigène des fortes doses et montre que celui-ci diminue lorsque la dose est étalée dans le temps



*On pourrait dire létal à 8 Sievert mais à forte dose c'est l'énergie qui compte et le Sievert n'a plus vraiment de signification

Effet des faibles doses :

< 100 millisievert

Les faibles doses de rayonnements ionisants correspondent à des irradiations pour lesquelles aucun effet néfaste sur la santé n'est observé.

À moins de 100 -200 mSv, les études épidémiologiques ne montrent pas d'augmentation significative du risque de cancer.

Les mécanismes de défense de l'organisme à faible dose sont différents et proportionnellement beaucoup plus efficaces que contre de fortes doses.

La Relation Linéaire Sans Seuil (RLSS) : un outil de radioprotection

L'académie de médecine considère qu'on ne peut donc pas estimer le nombre des victimes d'un accident nucléaire en multipliant des populations considérables par des doses infimes et en supposant que le risque est strictement proportionnel à la dose, si faible soit-elle.

Appliquer la Relation Linéaire Sans Seuil (RLSS) en dessous de 100 mSv, c'est un peu comme affirmer que si on donne 500 comprimés d'aspirine à une personne et qu'elle meure, alors chaque fois que 500 individus prennent un comprimé, alors l'un d'entre eux va mourir.

L'effet biologique des faibles doses est insignifiant par rapport aux autres facteurs de la vie courante !

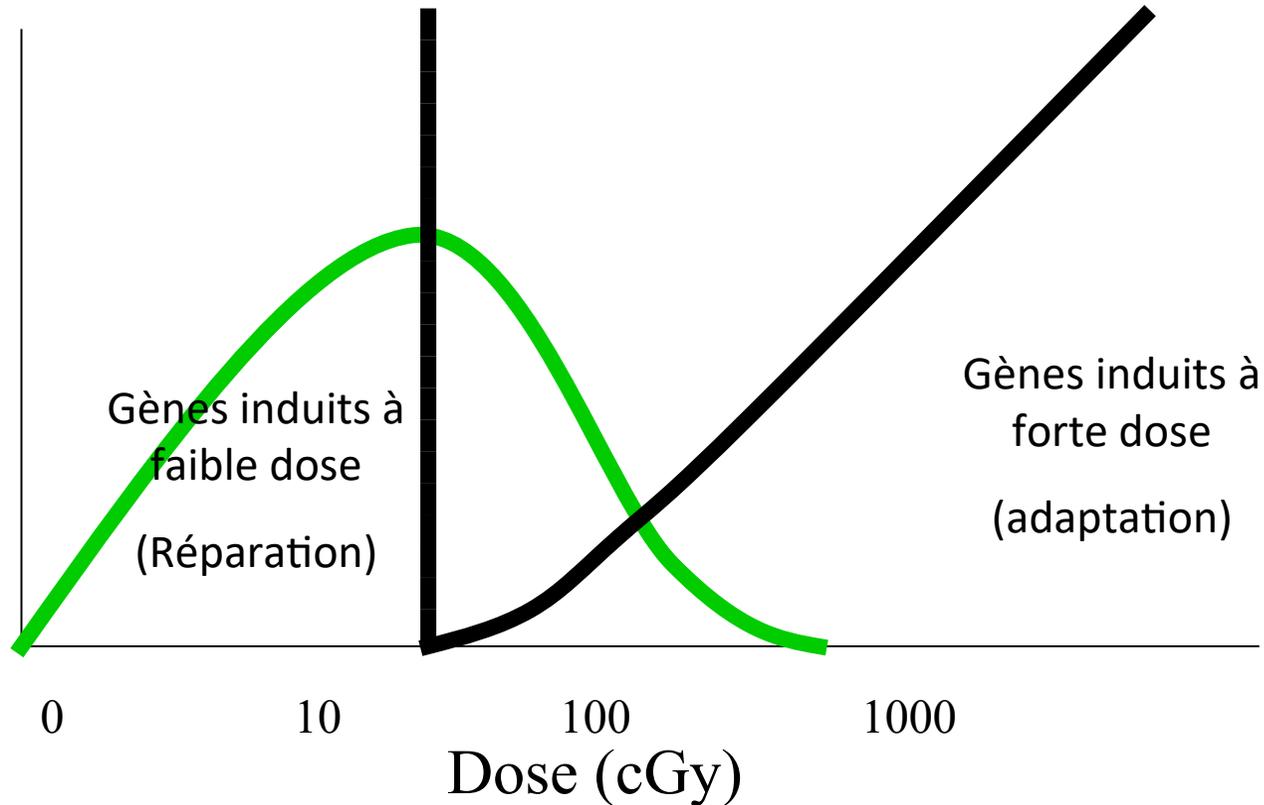
NOMBRE D'ALTÉRATIONS DE L'ADN PAR ORIGINE		
NATURE DES ALTÉRATIONS PAR CELLULE	CAUSES « NATURELLES » TOUTE ORIGINE (BIOLOGIQUE, CHIMIQUE, PHYSIQUE) NB PAR JOUR	RADIO-INDUITES POUR 3 μ Sv/JOUR (SOIT 1 mSv/AN) NB PAR JOUR
CASSURES SIMPLE BRIN	10 000 à 55 000	0,003
PERTES DE BASES	12 600	0,006
DOMMAGES DE BASES	3 200	
CASSURES DOUBLE BRIN	8	0,0001

Philippe Guétat et Jean-Marc Cavedon (CEA) Revue Générale Nucléaire de Janvier - Février 2015

L'effet Hormésis

"Les effets positifs à faible dose s'expliquent par une différence de réponse biologique à faible et forte dose"

Roland Masse, Visiatome 2011



Deuxième partie : « L'énergie nucléaire »

- les étapes nécessaires à la production d'électricité
- les ressources en uranium, la fabrication du combustible,
- le fonctionnement du réacteur,
- le recyclage des combustibles usés,

C'est-à-dire l'ensemble du **cycle du combustible**,
domaine où la France est en position de leader mondial

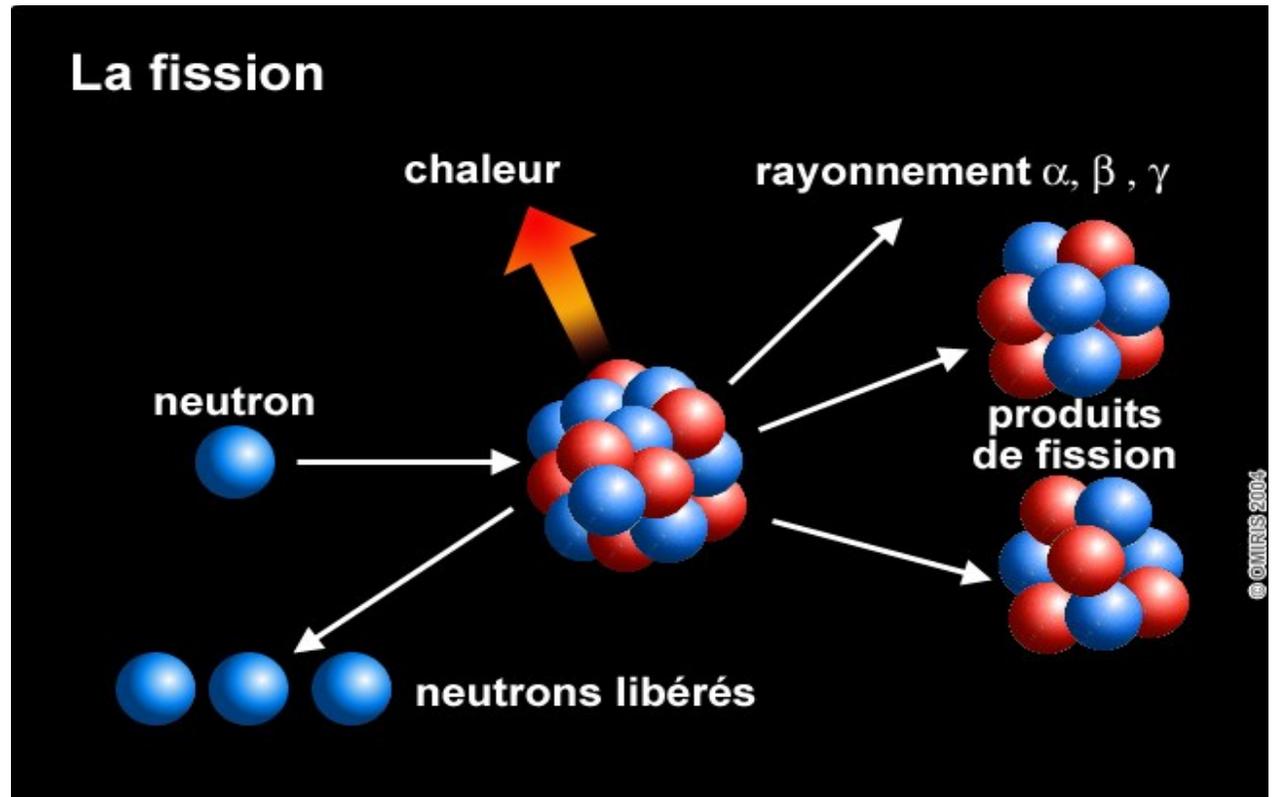
Origine de l'électricité en France

Chiffres 2018

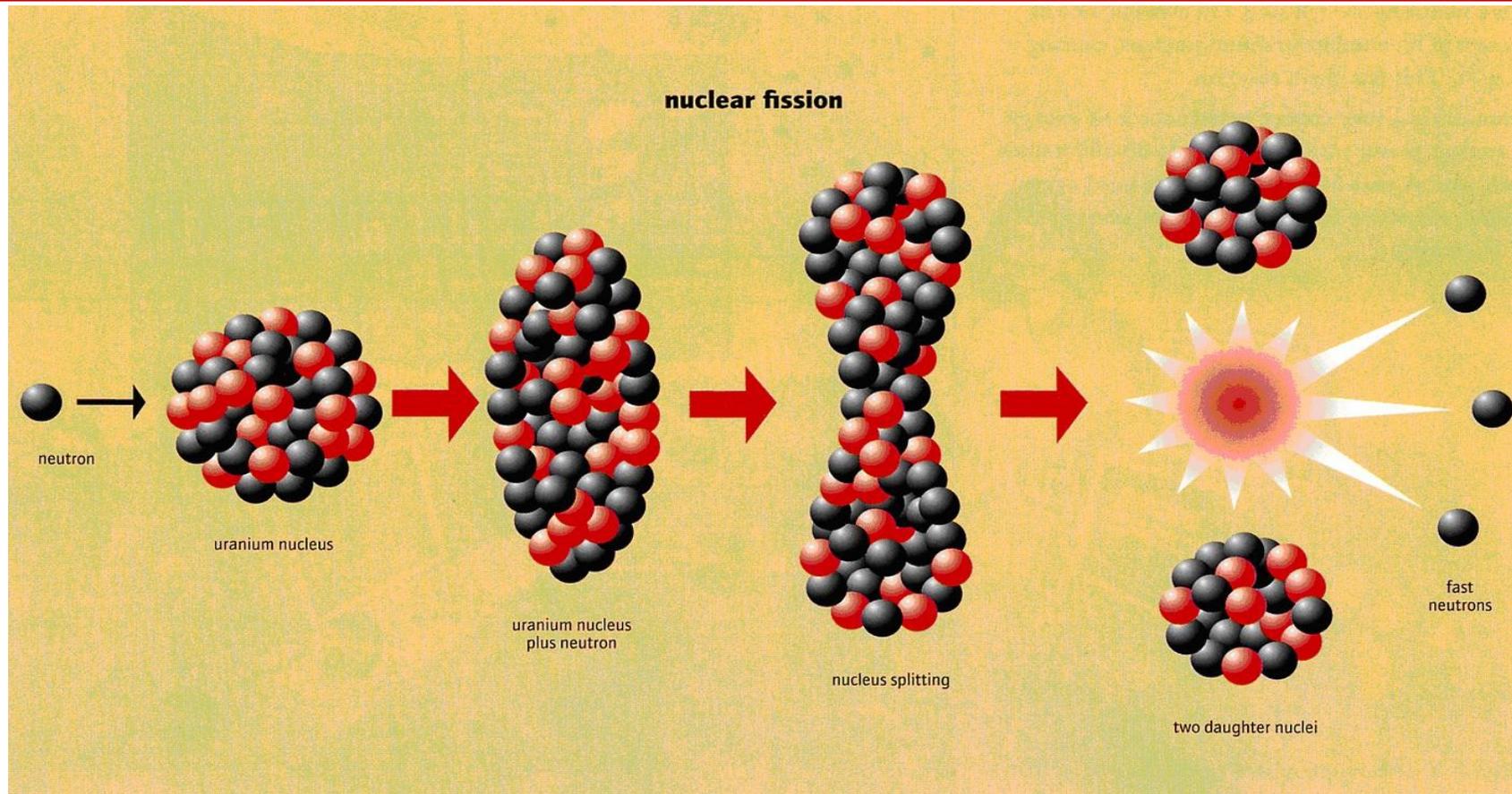
- ❖ 71,6 % nucléaire
 - 58 Réacteurs à eau Pressurisée (REP)
 - 63 GWe installés
- ❖ 1,4 % d'hydraulique
- ❖ 7.1 % de thermique
- ❖ 5,1 % éolien
- ❖ 1,8 % photovoltaïque
- ❖ 1,8 % divers (biomasse...)
 - Pas de CO2 produit
 - Électricité abondante à coût stable et maîtrisé
 - Indépendance énergétique du pays à 50%



La fission nucléaire



La fission nucléaire



neutron + un noyau fissile \rightarrow noyau instable \rightarrow
2 Produits de Fission + k neutrons et **beaucoup d'énergie**

La spécificité du nucléaire : une énergie très concentrée

– Combustible classique (énergie chimique) :

- Énergie produite de l'ordre de :



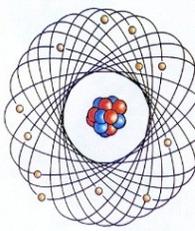
Soit quelques « grains d'énergie » (eV) par atome brûlé

– Combustible nucléaire (énergie nucléaire)

- Énergie produite de l'ordre de :

Uranium fissionné \rightarrow 2 «Produits de fission» + 200 Millions (eV) /atome

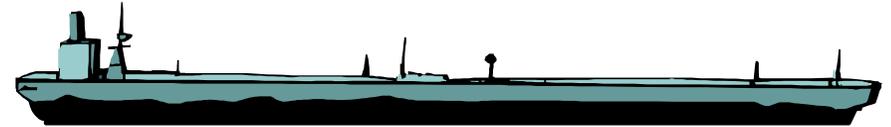
Soit quelques millions de « grains d'énergie » (eV) par atome brûlé



Pour alimenter pendant un an une centrale de 1000 MWe, il faut ...

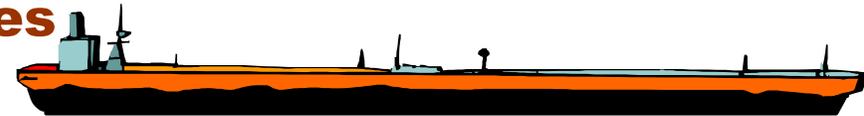
= environ 1,5 % de la consommation française (6,6 Mds kWh)

GAZ ⇒ 1,5 milliard de m³



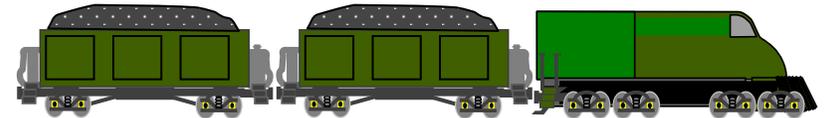
30 méthaniers

PÉTROLE ⇒ 1 600 000 tonnes



40 pétroliers

CHARBON ⇒ 2 500 000 tonnes



700 à 800 trains

URANIUM (REP) ⇒ 150 t d'U naturel
(24 t U enrichi)



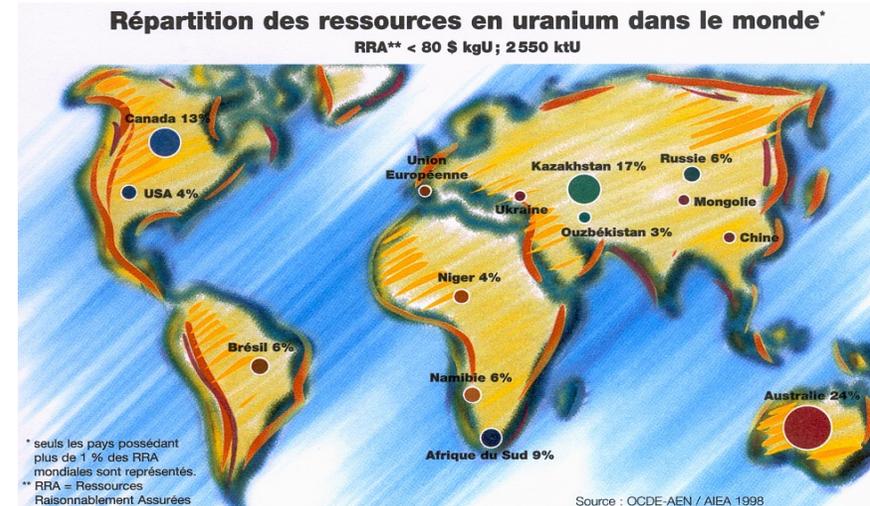
6 semi-remorques

L'Uranium

- Une ressource abondante
 - L'élément uranium (^{92}U) a trois isotopes naturels :
238 (99,28 %) *matière fertile*
235 (0,72 %) *matière fissile*
 - **U relativement répandu dans l'écorce terrestre (2 - 3 g/t)**



- ...et bien répartie



Réserves statiques évaluées à plus de 100 ans

Première étape : l'extraction ...de la mine au « Yellow cake »

- L'exploitation minière
En profondeur ou à ciel ouvert
- Traitement :
Les usines de traitement et
de concentration sont situées
près des mines
- Livraison du « **yellow cake**
»



L'enrichissement en U 235

- Objectif : passer de 0,7 % à 3-5 % en U 235
- **Les atomes d' U 235 et d' U 238 diffèrent très légèrement par**
 - la masse atomique des noyaux
 - les interactions de leur cortège électronique avec le milieu chimique ou les rayonnements électromagnétiques.
- **Possibilités de séparation isotopique**
 - Différence de masse
 - diffusion gazeuse à travers une barrière : **EURODIF**
 - ultracentrifugation gazeuse : **UCG**
 - Différence d'absorption d'énergie électromagnétique
 - ionisation sélective atomique : **SILVA**

Classement par efficacité croissante mais difficulté croissante

Le besoin de conversion avant enrichissement

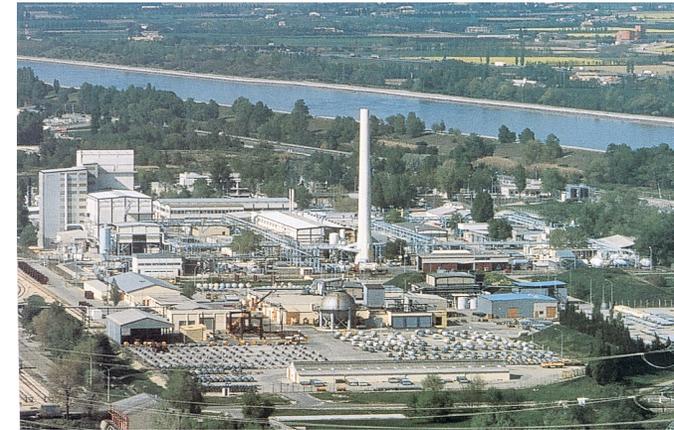
Aujourd'hui, c'est l'oxyde d'uranium UO_2 enrichi à 3 ou 4 % en isotope ^{235}U qui constitue la matière première pour réaliser les combustibles des réacteurs actuels (REP = Réacteurs à eau Pressurisée)

L'enrichissement en isotope 235 se fait à partir d'un composé d'uranium, gazeux à basse température, l'hexafluorure d'uranium UF_6 .

La conversion chimique vise donc essentiellement à transformer le "Yellow cake" qui arrive des mines en UF_6 .

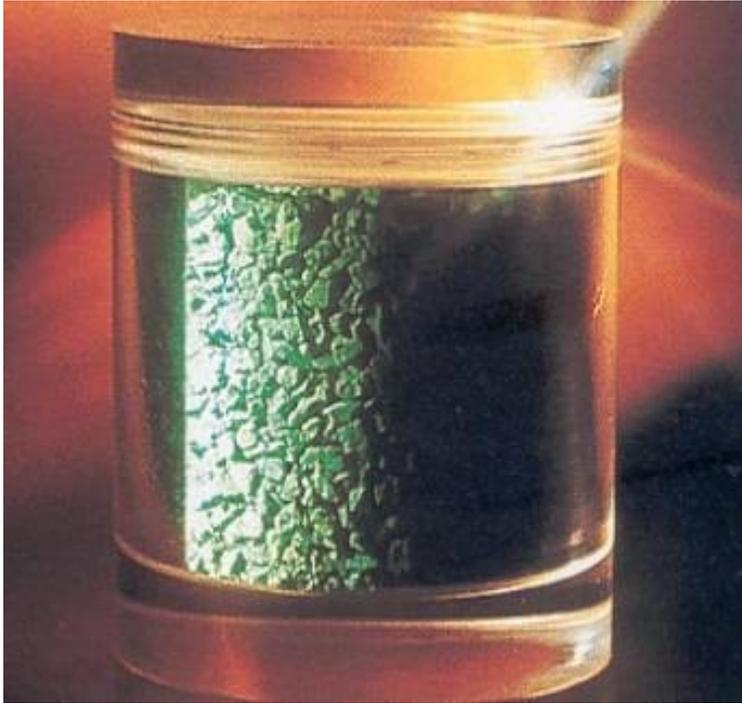


COMURHEX Usine de Malvesi



COMURHEX Usine de Pierrelatte

Les fluorures d'uranium produits



UF₄
Solide vert peu soluble



UF₆ cristallisé
Solide incolore, gazeux à 56°C
et très réactif avec l'eau

De GB1 (Eurodif) à GB2



L'usine EURODIF fermée en mai 2012.



La nouvelle usine Georges Besse II inaugurée début 2013

L'enrichissement par ultracentrifugation

L'uranium gazeux (UF₆) est enrichi en ²³⁵U à Pierrelatte

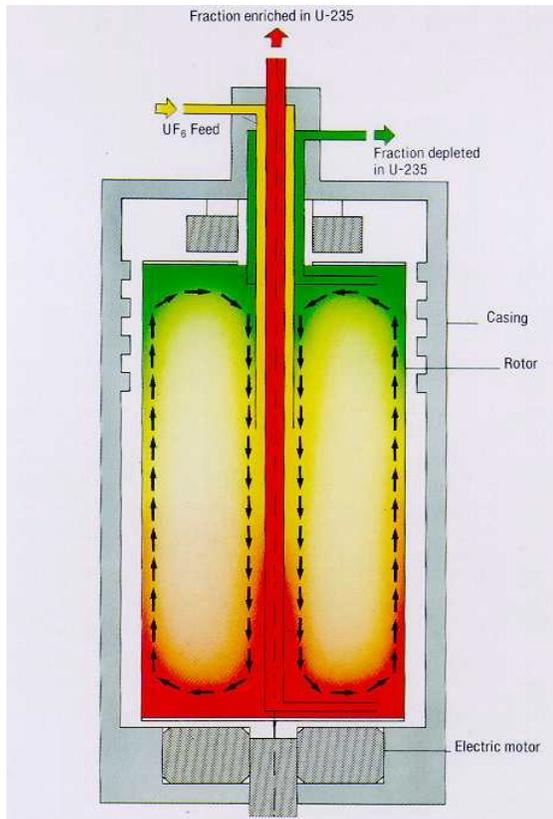


Schéma de principe
d'une centrifugeuse

Le plus lourd (U²³⁸)
va
préférentiellement
vers l'extérieur ce
qui permet d'obtenir
de l'uranium
« enrichi » en
isotope 235 au
centre de la
machine.



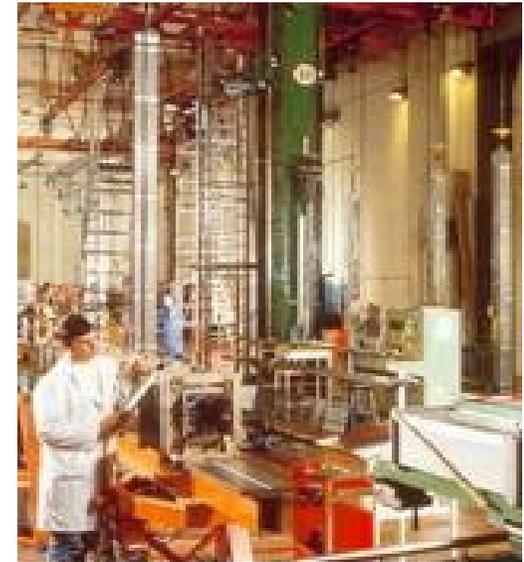
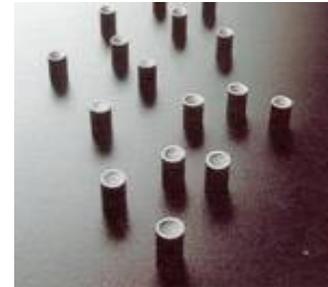
La nouvelle usine
Georges Besse II



L'usine EURODIF
fermée en mai 2012.

Les étapes de fabrication d'un assemblage combustible

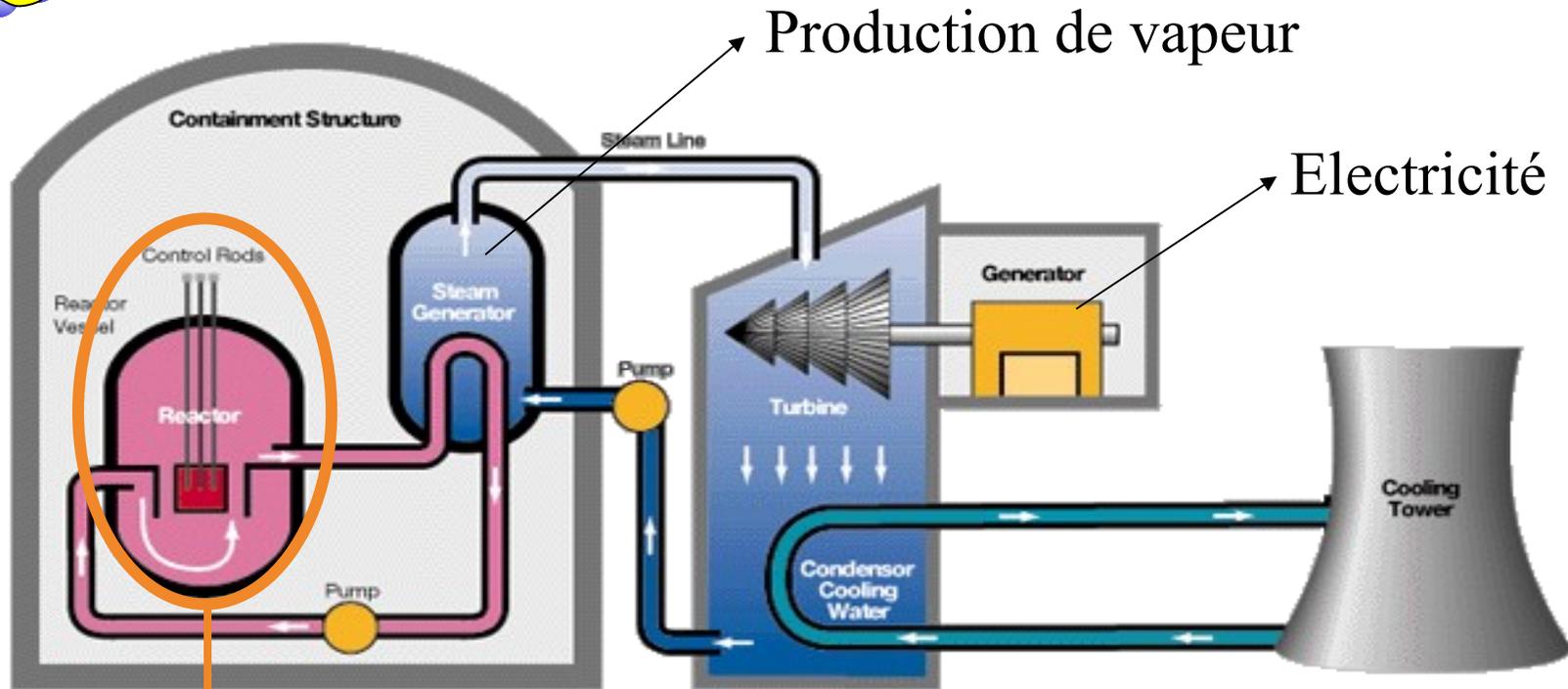
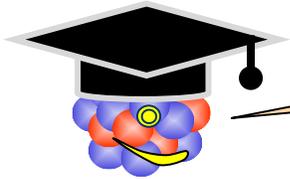
1. Conversion UF_6 en UO_2
2. Frittage de la céramique sous forme de « pastilles »
3. Fabrication de l'élément de base, le crayon avec sa gaine en zircalloy.
4. Montage de l'assemblage, avec ses crayons et les absorbants de commande



Assemblage
FRAMATOME

Qu'est ce qu'une centrale nucléaire ?

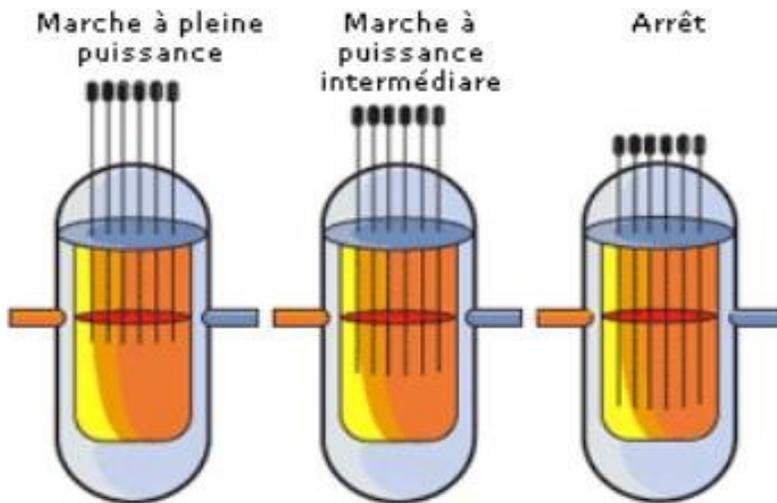
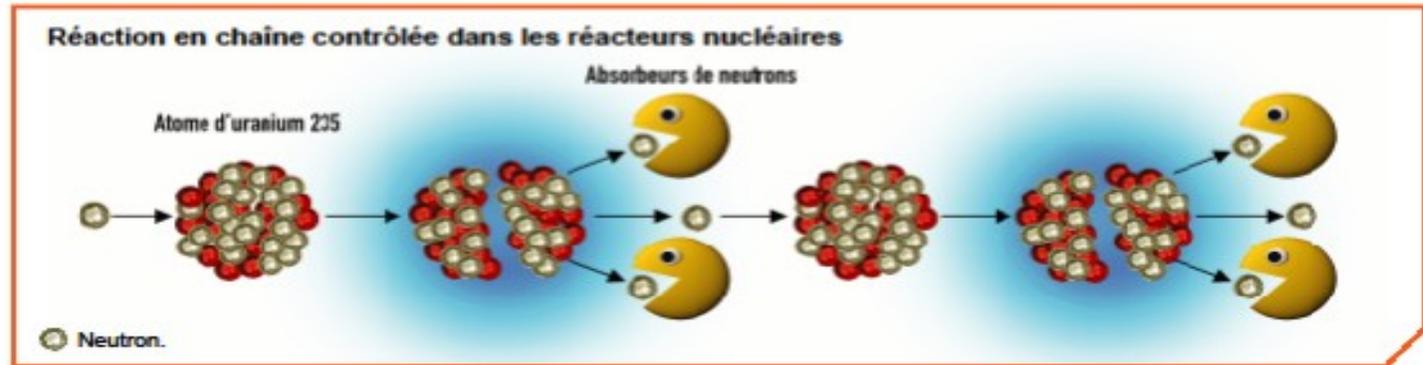
La différence majeure vient du moyen de produire la chaleur pour faire de la vapeur !



→ Réacteur nucléaire → Production de chaleur par fission

Le pilotage du réacteur

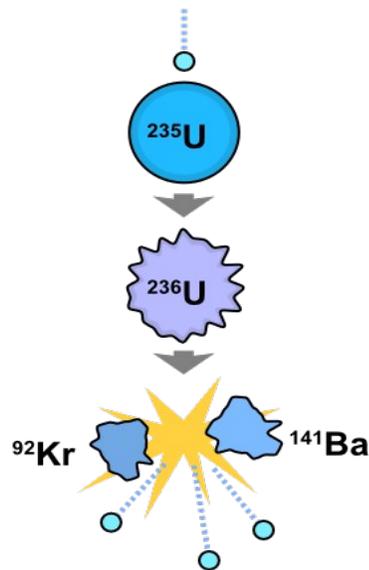
La réaction est contrôlée par des **absorbants neutroniques** (bore, gadolinium, cadmium...) présents dans les barres de contrôle ou dans le fluide caloporteur



Quels radioéléments sont produits par un réacteur nucléaire ?

❖ Fission nucléaire :

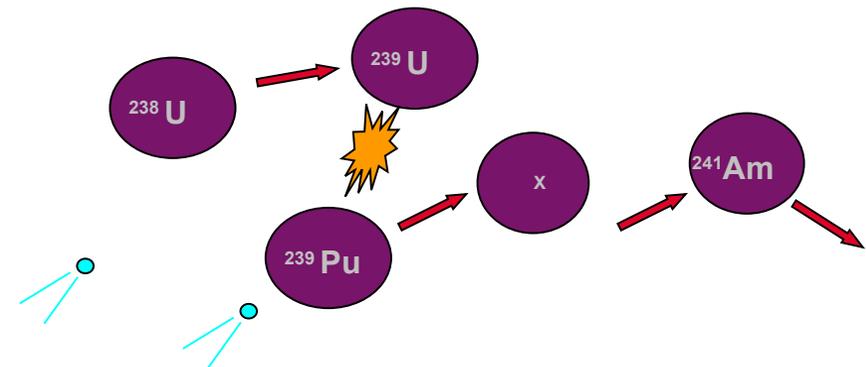
Un neutron est absorbé par le noyau d' ^{235}U qui se casse en deux, produisant deux éléments plus légers (produits de fission), en émettant des neutrons.



Les « Produits de Fission » constituent le principal déchet ultime de la fission nucléaire.

❖ Transmutation par capture

Par exemple ^{238}U capture un neutron, se transforme en ^{239}U , qui se transforme en plutonium 239 par 2 désintégrations β

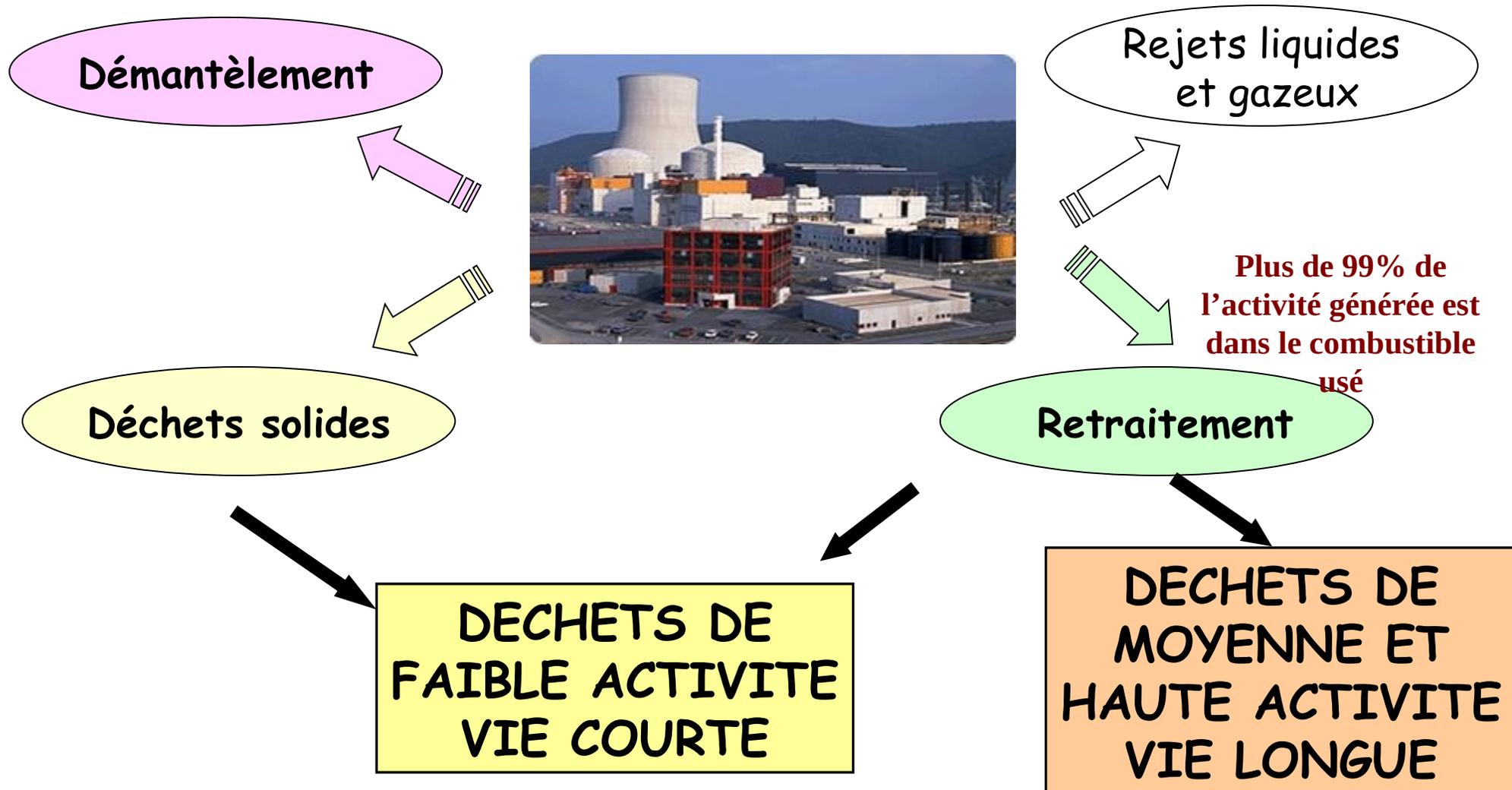


Produit du « Plutonium », et quelques «actinides mineurs»

qui peuvent être considérés

- soit comme un déchet
- soit comme une ressource !

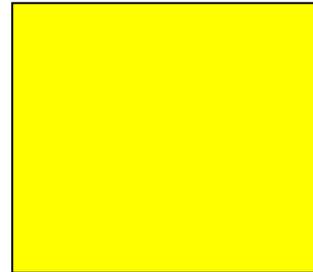
Les déchets radioactifs produits par les centrales nucléaires



Le combustible nucléaire utilisé



Après 4 ans en réacteur, le combustible utilisé contient :



94 % d'uranium



1 % plutonium



**5 % autres
(Produits de fission
et actinides mineurs)**

Cycle ouvert / Cycle fermé

En fin d'usage, après retrait du combustible irradié hors du réacteur :

- il reste une matière durablement chaude et active
- le combustible est peu "usée" en atomes lourds
(qqs % de leur masse initiale)

Problème particulier du nucléaire : Que faire du combustible usé ?

⇒ Le déclarer déchet global, et choisir le **"cycle ouvert"** ?

⇒ Le traiter pour récupérer et recycler les noyaux lourds, et choisir le **"cycle fermé"** ?

Pour les 2 options commencer par un refroidissement par décroissance radioactive et un confinement en entreposage.

Le combustible nucléaire usé est mis à refroidir en piscine

Après 4 ans en réacteur, le combustible usé est chaud et très radioactif .

Il est entreposé :

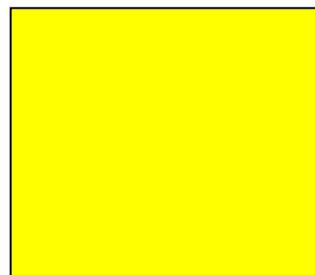
- ❖ Au moins une année en piscine des réacteurs
- ❖ Quelques années en piscine des usines de retraitement (La Hague)



En France le combustible nucléaire utilisé est retraité



Après 4 ans en réacteur, le combustible utilisé contient :



94 % d'uranium

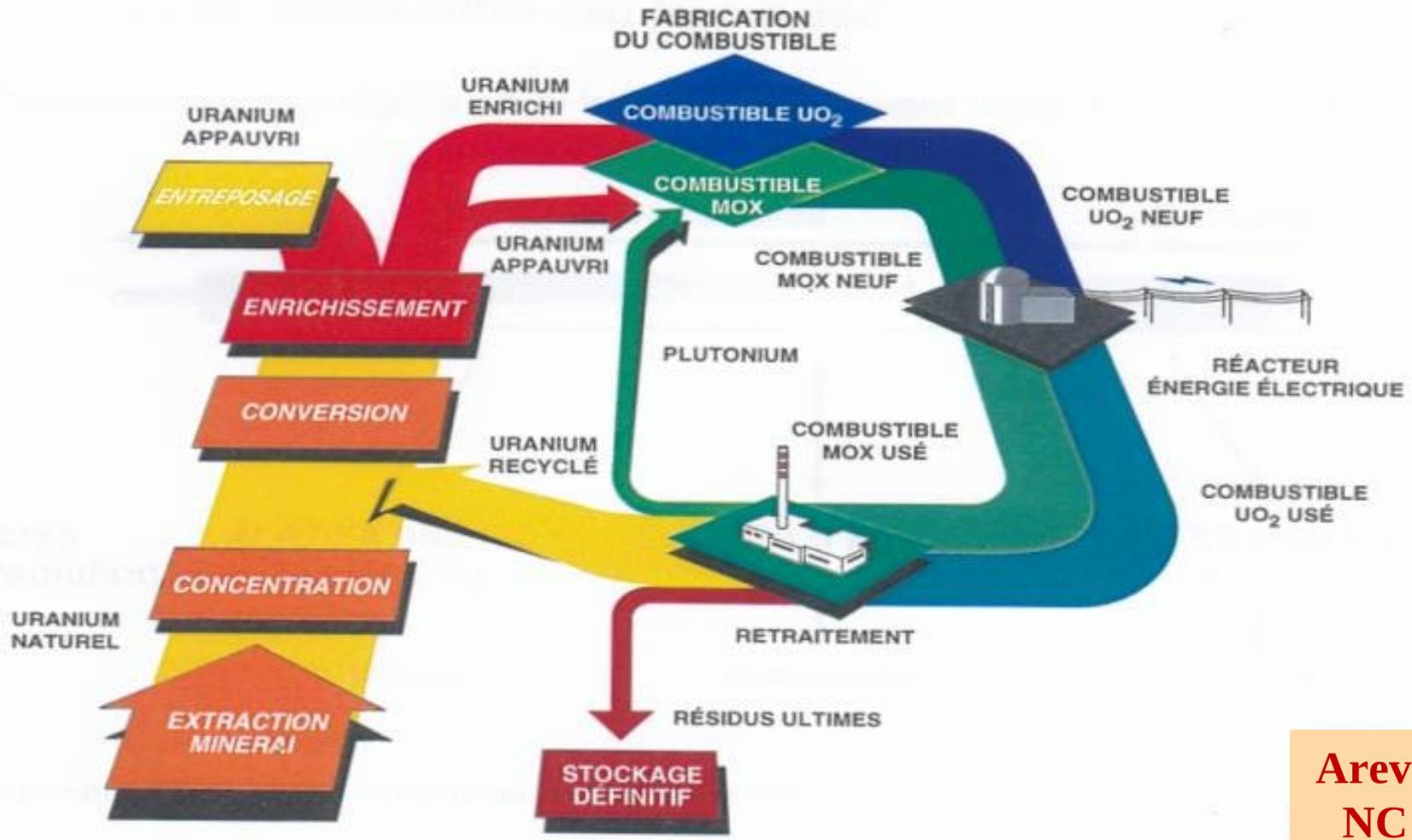


1 % plutonium



5 % autres
(Produits de fission
et actinides mineurs)

Le cycle du combustible nucléaire



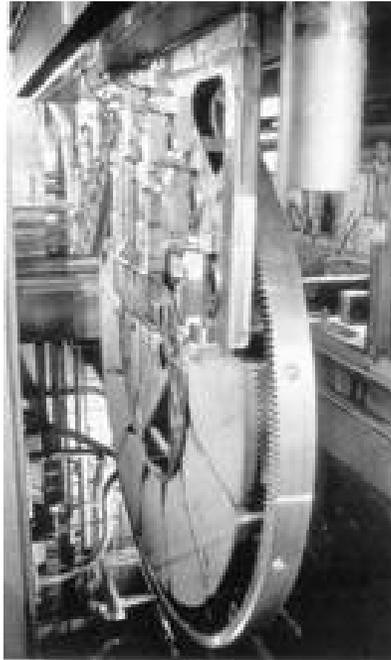
Areva
NC

Site des usines UP 3 et UP 2-800 à La Hague /Cotentin

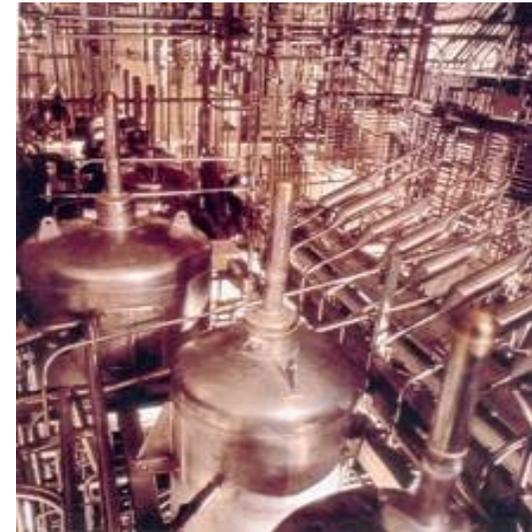
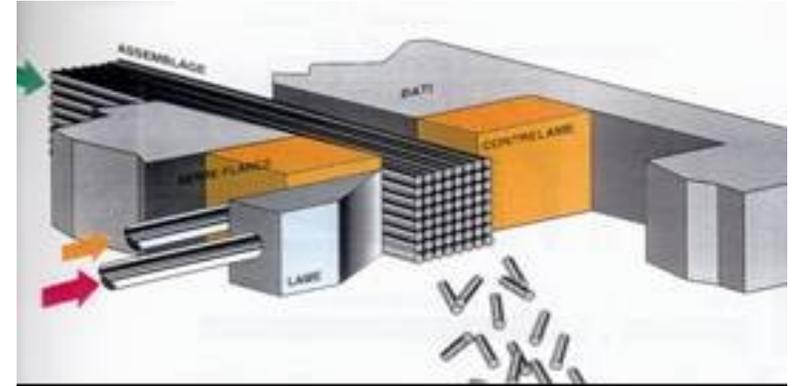


Les principales étapes du retraitement

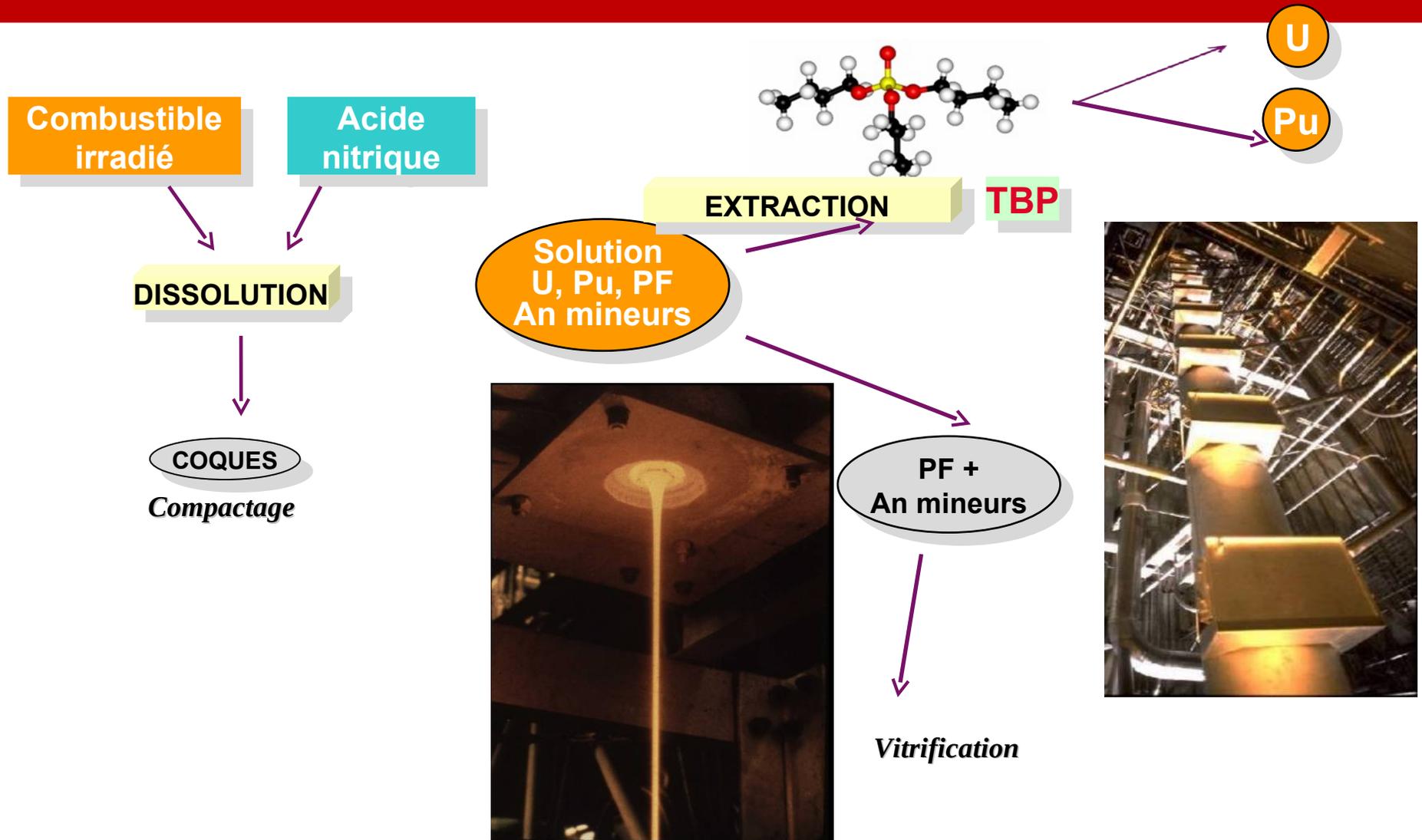
- Le cisailage des assemblages combustibles
- La dissolution nitrique
A La Hague procédé continu, avec dissolvant roue à godets
- L'extraction liquide / liquide par le TBP.
Uranium et Plutonium sont récupéré à 99,9 % !



Roue étroite pour sous-criticité



Le retraitement : procédé PUREX



Le plutonium récupéré est recyclé en totalité dans les MOX

- Les MOX sont des combustibles fait par mélange d'oxyde de Plutonium (~ 8%) et d'oxyde d'Uranium appauvri (~ 92 %) .
- 22 de nos réacteurs sont "Moxés", c'est à dire chargés à 30% en MOX



L'usine MELOX à Marcoule

Ce recyclage permet d'économiser environ 12% d'Uranium naturel.

L'Uranium récupéré peut être recyclé

Environ 1000 tonnes
de combustible retraité chaque année :

→ 940 t d'Uranium de retraitement (URT)
dont 600 t sont ré enrichies (URE)

→ 75 t d'URE / an
(charge annuelle de 4 réacteurs)

→ 75 t d'URE usé produites / an ne sont
pas retraitées

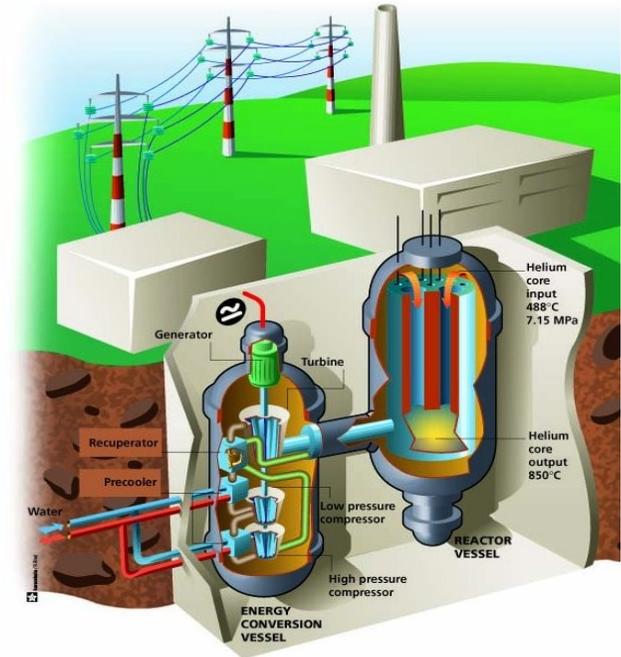


Les 4 réacteurs de Cruas alimentés en uranium recyclé

Ce recyclage permet d'économiser environ 7% d'Uranium naturel.

Le nucléaire du futur : L'intérêt des réacteurs à neutrons rapides « GEN IV »

Avec la technologie des réacteurs à neutrons rapides (RNR), capable de brûler la totalité de l'uranium et pas seulement les 0.7% d'U235 actuel, la limite des réserves connues est multipliée par 100 et dépasse les 10 000 ans

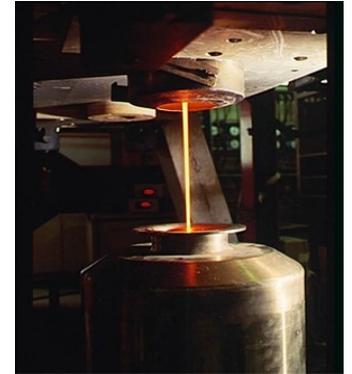


NB- En fabricant plus de matière fissile qu'ils n'en consomment, les « surgénérateurs », font de énergie nucléaire une énergie quasiment renouvelable

Les déchets ultimes du retraitement sont conditionnées

- La solution de produit de fission est **vitriifiée**
- Les déchets de gaine (coques) sont rincés puis **compactés**
- Les déchets technologiques sont **cimentés**

Le volume de déchets produit est d'environ 100 m³ par réacteur et par an dont seulement quelques % de haute activité.



Troisième partie :

« Conditionnement et stockage des déchets ultimes »

Généralités sur les déchets nucléaires

« Résidu provenant de l'utilisation de matières radioactives, dont aucun usage n'est prévu dans l'état actuel des connaissances et dont le niveau d'activité ne permet pas, sans contrôle, l'évacuation dans l'environnement. »

J.O. du 03.08.2000

Equivalent anglais : *radioactive waste, radwaste*

Loi française du 13 juillet 1992

maintenant intégrée au code de l'environnement

DEFINITION DU DECHET ULTIME :

« ... qui n'est plus susceptible d'être traité, dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux »

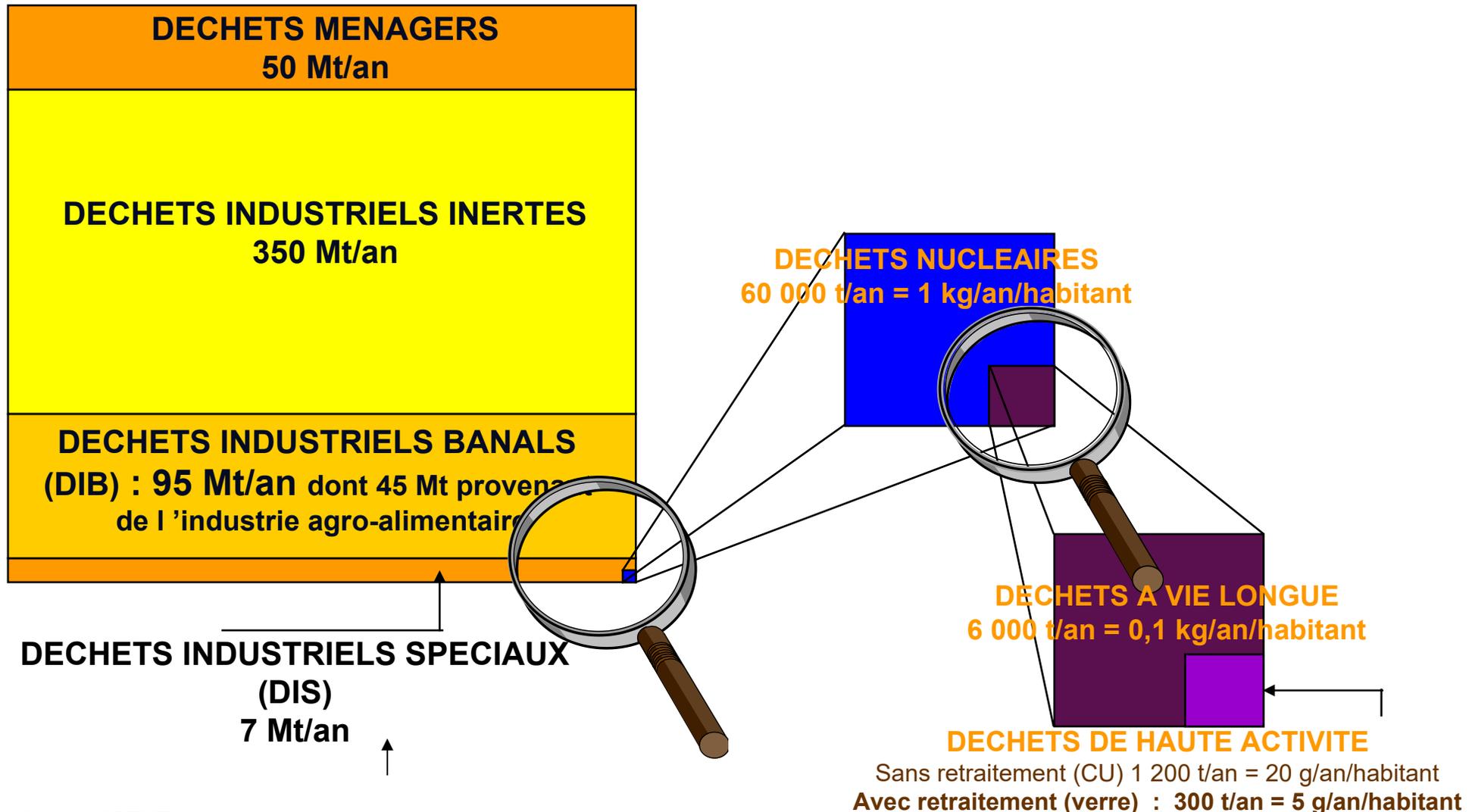
- Parallèle avec le principe « ALARA » (As Low As Reasonably Achievable) qui régit le nucléaire depuis très longtemps

Au vu de cette loi le combustible utilisé
n'est pas un déchet ultime !

LES DIFFÉRENTES SORTES DE DÉCHETS

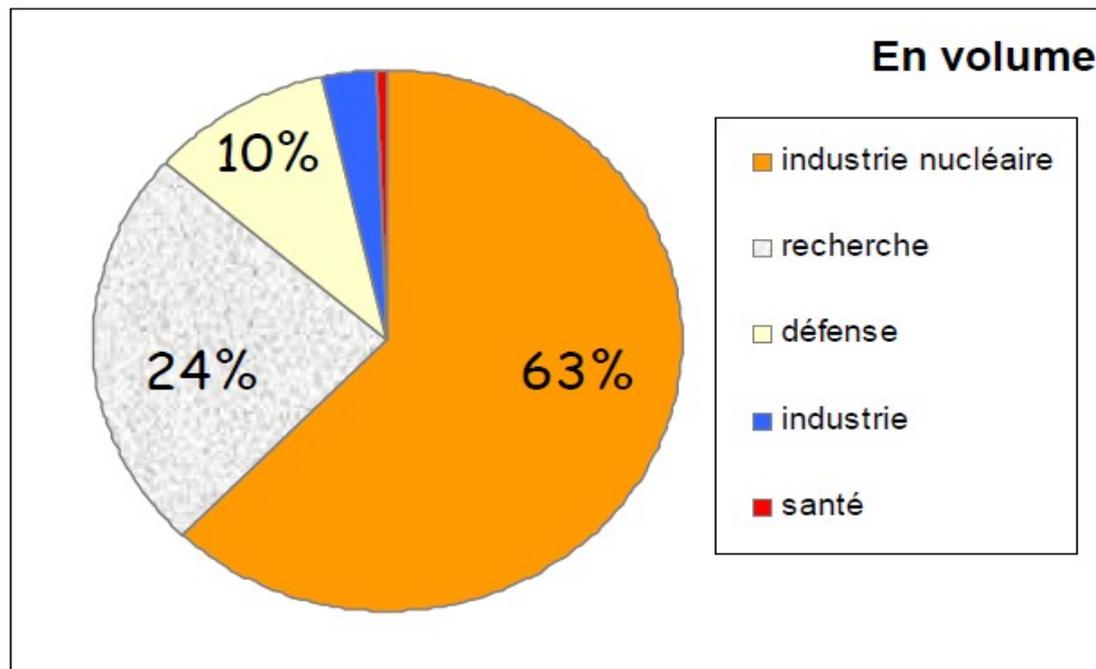
- Les déchets ménagers
- Les déchets industriels
 - les déchets dits inertes
 - les déchets dits banals (DIB)
 - les déchets dits spéciaux (DIS)
 - dont les déchets radioactifs
- Les déchets agricoles

La part des déchets nucléaires dans les déchets industriels



Source : ADEME ([www.environnement.gouv](http://www.environnement.gouv.fr))

D'où viennent les déchets nucléaires ?



...mais plus de 99 % des radionucléides viennent des combustibles usés

SECTEURS ÉCONOMIQUES



PRODUCTION
ELECTRONUCLEAIRE



RECHERCHE



DÉFENSE



INDUSTRIE NON
ELECTRONUCLEAIRE



MÉDICAL

Classification des déchets solides nucléaires en France

Le tri des déchets se fait à la fois sur la période et sur l'activité

	Vie Courte (VC) Période < 31 ans	Vie Longue (VL) Période > 31 ans
Très Faible Activité (TFA)	Déchets TFA Stockage de surface <i>(Centre Industriel de Regroupement, d'Entreposage et de Stockage – Cires - à Morvilliers)</i>	
Faible Activité (FA)	Déchets FMA-VC (dit « déchets A ») Stockage de surface <i>(Centre de Stockage de l'Aube – CSA - à Soulaines)</i>	Déchets radifères et graphite FAVL (Stockage à faible profondeur à l'étude dans le cadre de la loi du 28 juin 2006)
Moyenne Activité (MA)		Déchets MAVL (dit « déchets B ») Stockage géologique profond <i>(Projet « Cigeo » à l'étude dans le cadre de la loi du 28 juin 2006)</i>
Haute Activité (HA)	Déchets HAVL (dit « déchets C ») Stockage géologique profond <i>(Projet « Cigeo » à l'étude dans le cadre de la loi du 28 juin 2006)</i>	

CLASSEMENT DES DECHETS

Déchets à vie courte

Catégorie A

Déchets de FA/MA-VC - RN < 31 ans
 $\alpha < 3,7 \text{ MBq / kg}$ (0,1 Ci/t) pour le colis
 $0,37 \text{ MBq / kg}$ (0,01 Ci/t) pour le site
Stockage de surface



Manutention d'un
conteneur de déchets
FA

Déchets à vie longue

Catégorie B

(Déchets MAVL (Déchets α) RN > 30 ans
 $\alpha > 3,7 \text{ MBq / kg}$ (0,1 Ci/t)
Pas de dégagement de chaleur
Entreposage puis stockage géologique



Coques
compactées



Boues
bitumées

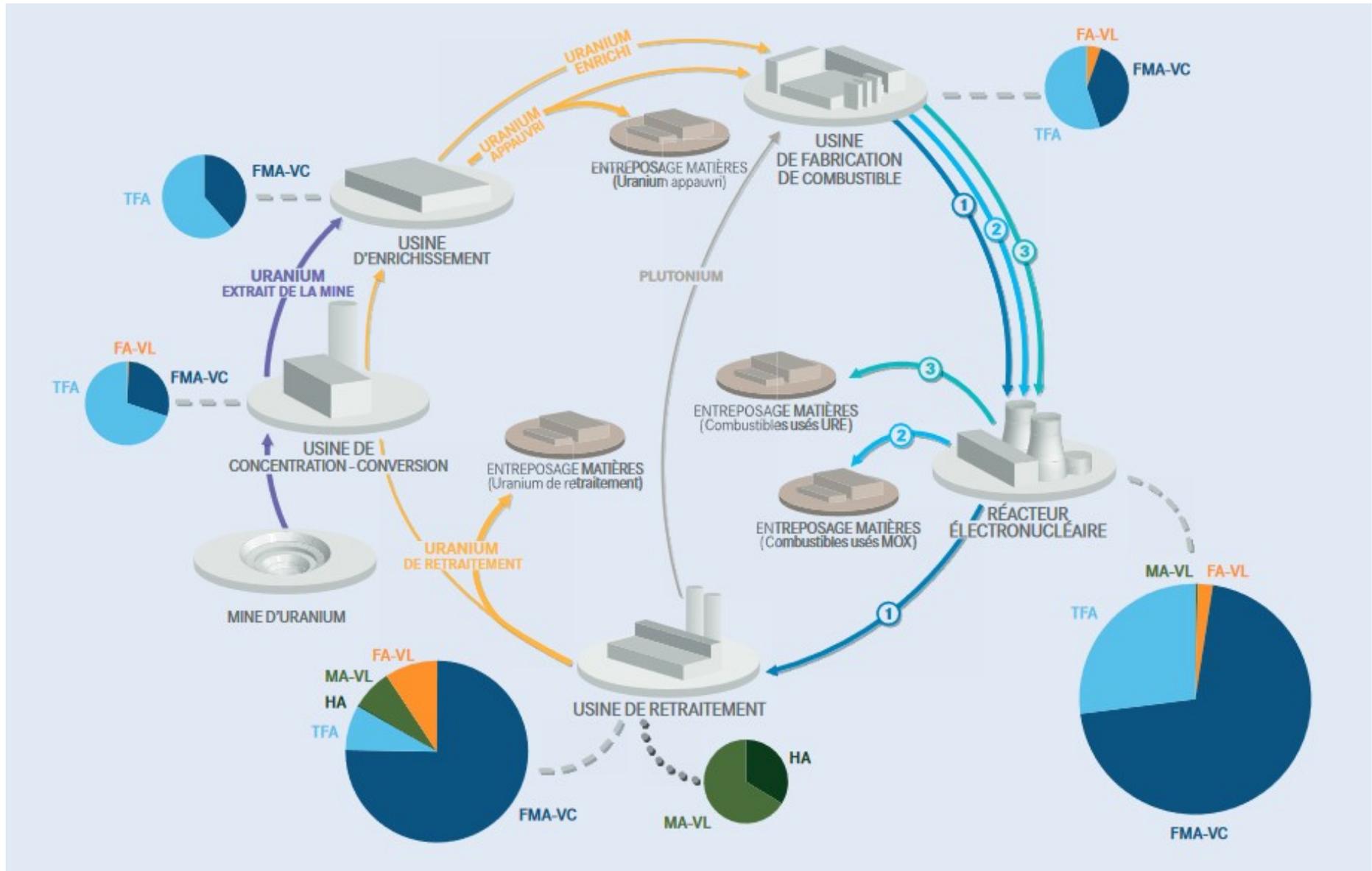
Catégorie C

Déchets HA essentiellement
verres de P.F
Dégagement de chaleur
Entreposage puis stockage géologique



Colis de
PF
vitrifiés

Le cycle du combustible nucléaire



Déchets: classifications & activités

- **Classement selon l'activité radiologique (source ANDRA) jusqu'au PNGMDR ...**

Type de déchets	Activité
HA	milliard de Bq/g
MA	million de Bq/g
FA	quelques 100 000 Bq/g
Graphites	100 000 Bq/g
Radifères	10 à 8000 Bq/g
TFA	10 Bq/g

Complexité d'une solution de produits de fission issue du retraitement d'un combustible REP

Produits de Fission = 42.33 g/l

Se	Rb	Sb	Sr
Te	Y	Cs	Zr
Ba	Nb	La	Mo
Ce	Tc	Pr	Ru
Rh	Pd	Nd	Pm
Sm	Eu	Gd	Ag
Cd	In	Sn	Tb
	Dy		

Alliages métalliques = 4.69 g/l

Ru	Mo	U	Rh	Tc
	Pd	Sn	Sb	

Actinides = 3.37 g/l

U	Np	Am	Pu	Cm
---	----	----	----	----

Produits de corrosion et d'addition =
27.33 g/l

Fe	Na	Cr	Ni	P
----	----	----	----	---

Naissance de la Vitrification dans les années 50

Les solutions de Produits de Fission (PF) représentaient le principal déchet radioactif

Il était inconcevable de conserver ces solutions des dizaines de milliers d'années.

La première idée, en Angleterre et en France, a été de les transformer en **matériaux cristallisés** ... but mais cette idée est vite apparue irréaliste.

L'idée de faire un verre a été retenue au Canada et en France à la fin des années 50.

Premier verre actif réalisé à Saclay par Roger Bonniaud en 1957

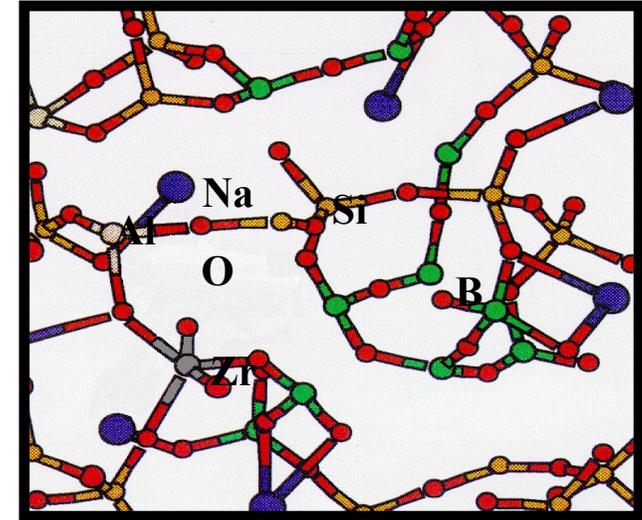


Mica-phlogopite



**Une nouvelle application du verre était née :
les verres de confinement.**

Un véritable confinement à l'échelle atomique et non un enrobage!



La formulation d'un verre de déchet est un compromis

Capacité à incorporer tous les éléments dans la structure

Solubilité (Cr, Ru, Rh, Pd, Ce, Pu, SO₄, Cl)
Séparation de phase (Mo, SO₄, Cl, P)
Dévitrification (Mo, P, F, Mg, ...)
Maximisation de la charge en déchet

Contraintes Technologiques

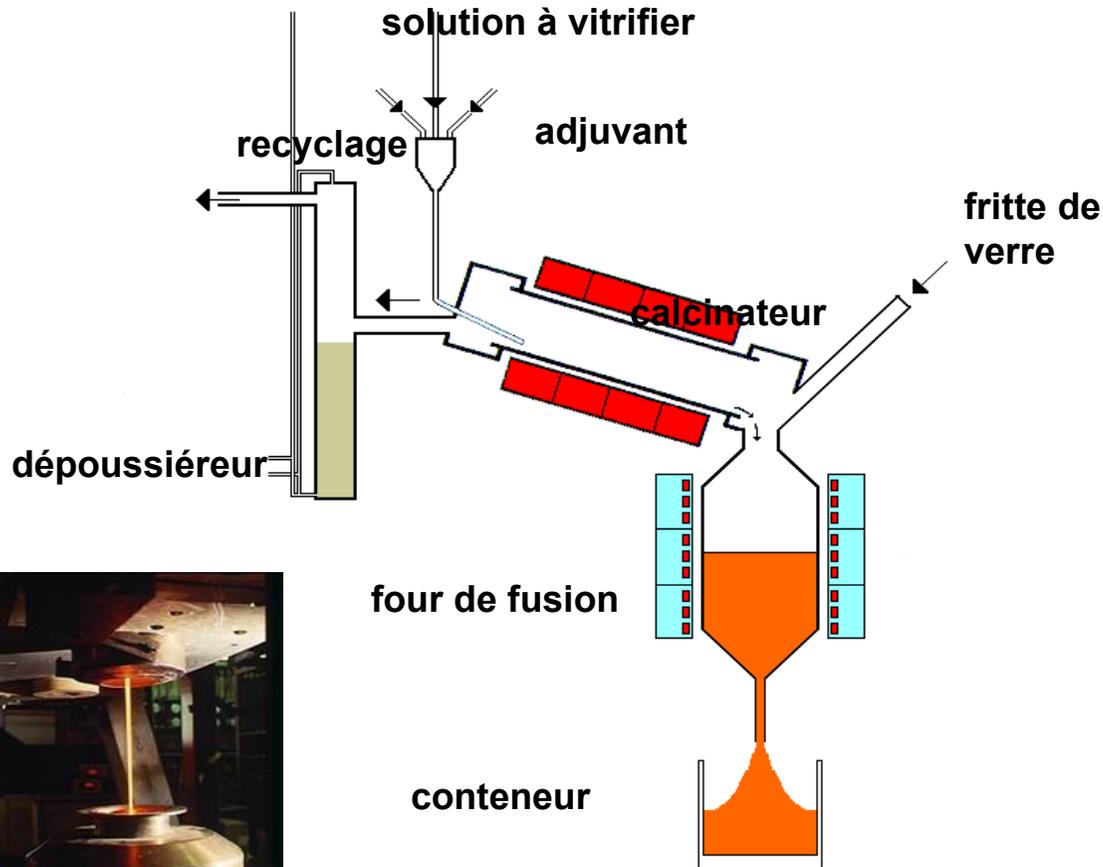
Facilité d'élaboration
Température de fusion
Viscosité, réactivité, temps de séjour
Conductivité électrique et thermique
Additifs nécessaires



Performances du verre

Entreposage et stockage
Stabilité Thermique
Durabilité Chimique
Résistance à l'auto-irradiation
Propriétés Mécaniques

Procédé Continu de Vitrification



Mise en actif par Areva :

▪ En 1978 de l'Atelier de Vitrification de Marcoule (AVM)



En 1989 de l'Atelier de Vitrification de La Hague (AVH)

▪ démarrage de R7 en 1989, puis de T7 en 1992

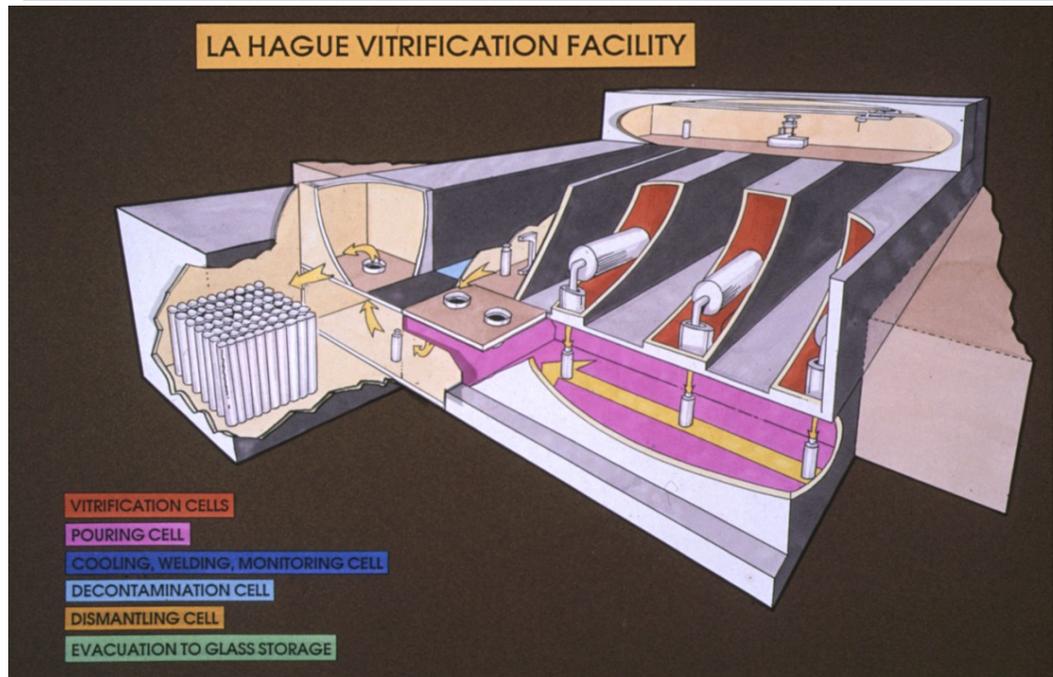


Vitrification La Hague

6 lignes de vitrification à la Hague:

- 3 à R7 (UP2)
- 3 à T7 (UP3)

Hot cells vitrification lines



Le colis de déchets vitrifiés

Données pour 1 conteneur

Puissance thermique ~ 2 kw

Activité moyenne $\beta\gamma$: 16 000 TBq

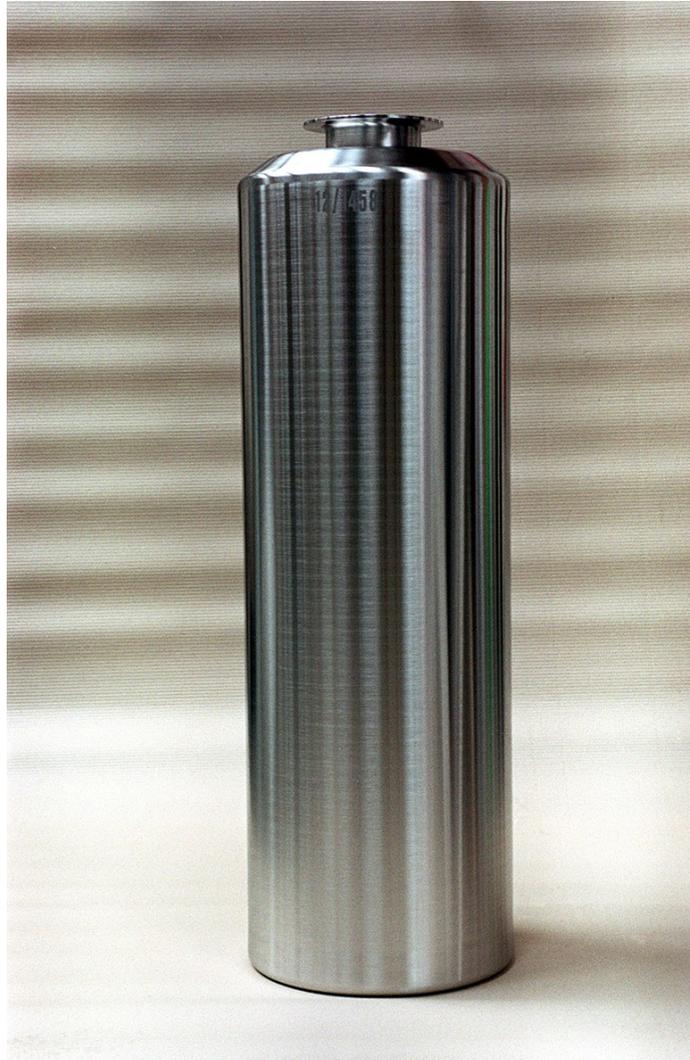
(au moment de la coulée)

Activité moyenne α : 230 TBq

Contamination surfacique < 4Bq. cm⁻²

Déchet C

* Spécifications approuvées internationalement



Volume de verre »
150 litres

Poids net de verre »
400 kg

Hauteur 1,3 m

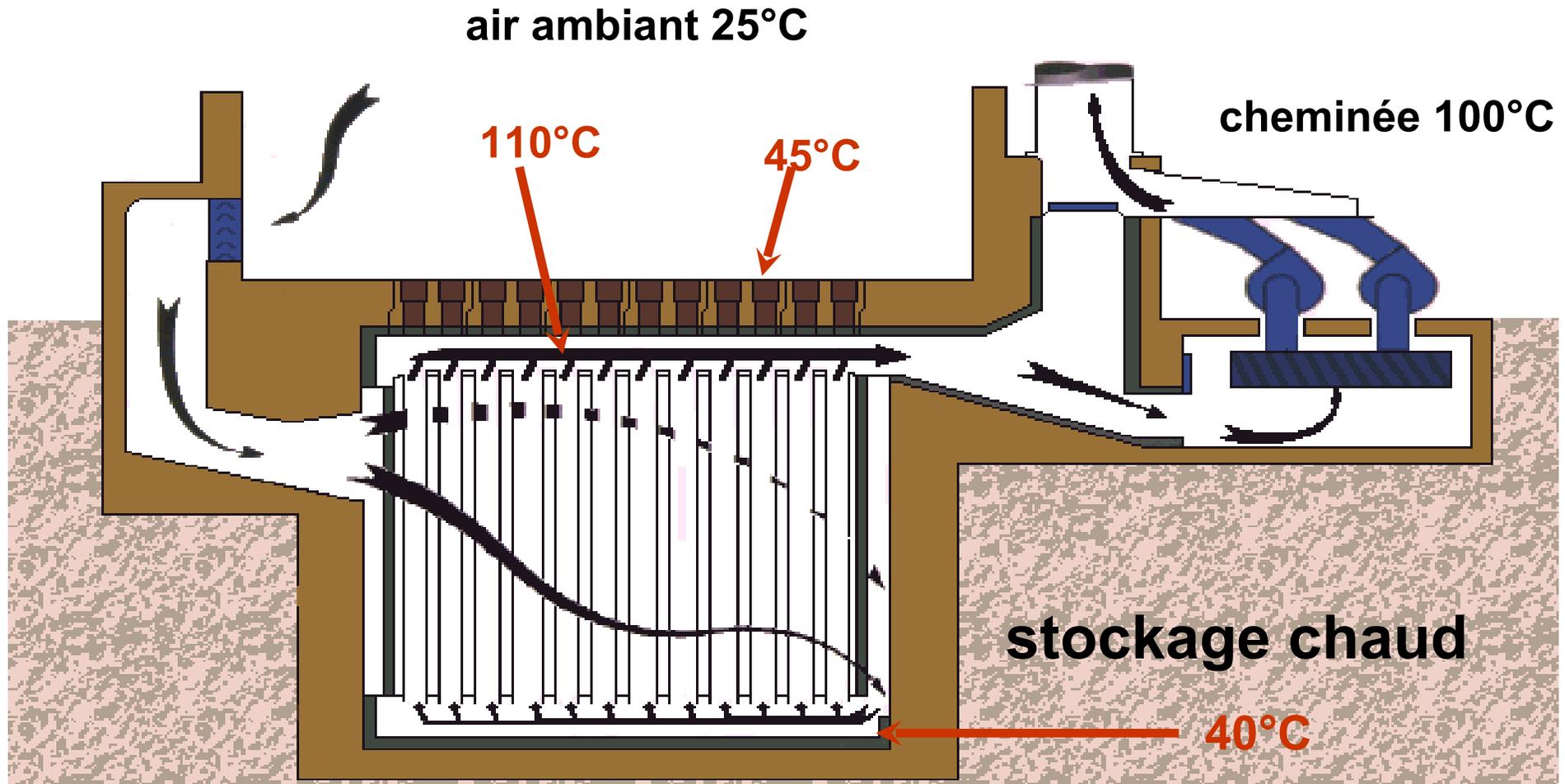
Diamètre 0,43 m

Entreposé en puits ventilé

En moyenne 0,7
conteneur par t U

Entreposage des Verres à La Hague

(Refroidissement à air par convection forcée)



L'entreposage des verres (déchets C)



à Marcoule



à La Hague

Traitement des coques et embouts

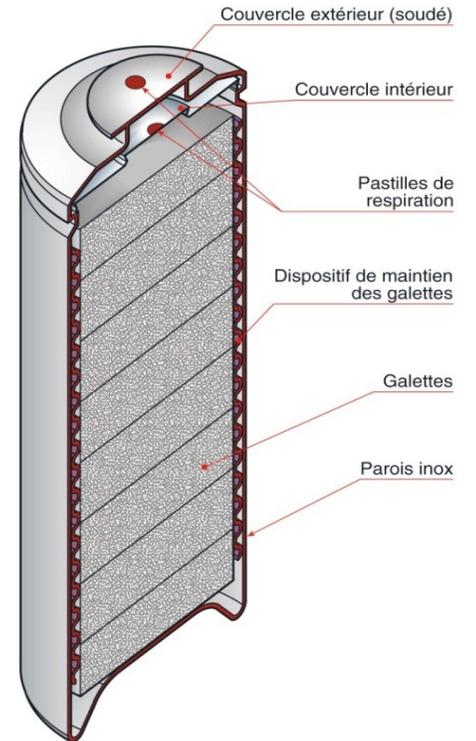


Cimentées jusqu'en 1995



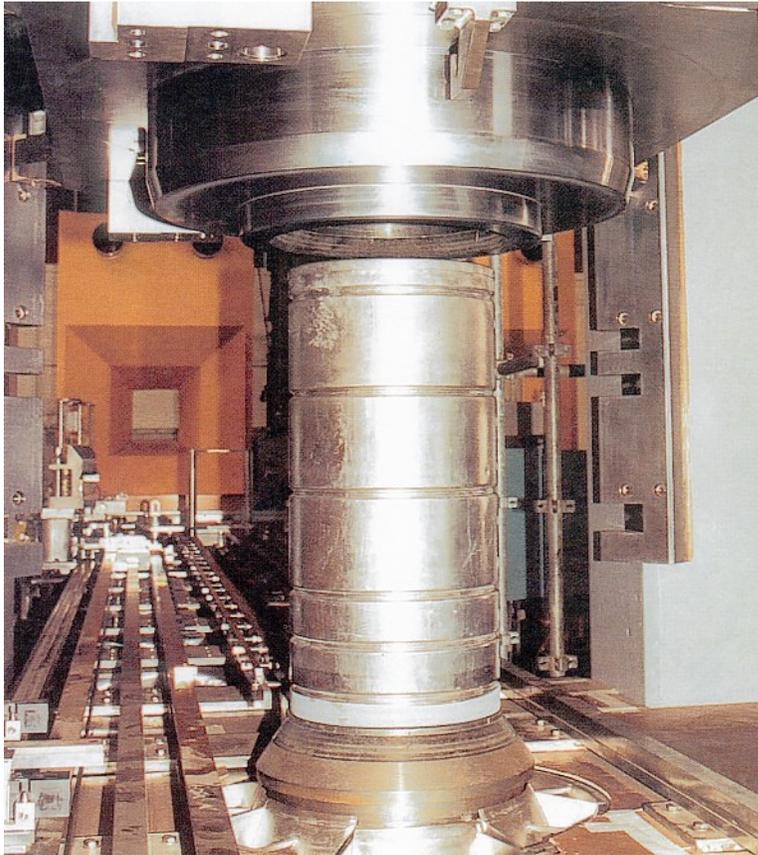
Crédit COGEMA

← Coques et embouts →



Compactage CSD-C

Déchet B : Les déchets de gaines compactés



Presse de compactage
(*La Hague*)



Galette de compactage



Un CSD-C

Les déchets technologiques sont cimentés

Déchets hétérogènes

- Etapes principales du procédé
 - Tri des déchets
 - Traitement de réduction de volume (compactage, découpe ...)
 - Mise en conteneurs et blocage mécanique (coulis)
Adaptation du conteneur suivant l'activité du déchet



Conteneur béton-fibre CBFC



Atelier AD2 La Hague : Presse 1500 t

Les déchets A (FA/MA-VC) sont conditionnés...



Coques en béton



Déchets technologiques

...ou dans du bitume.

...dans du béton



Les déchets A, de Faible et Moyenne Activité à Vie Courte

Sont ensuite stockés en surface
par l'ANDRA,
au Centre de Stockage de l'Aube (CSA),
à Soulaine.

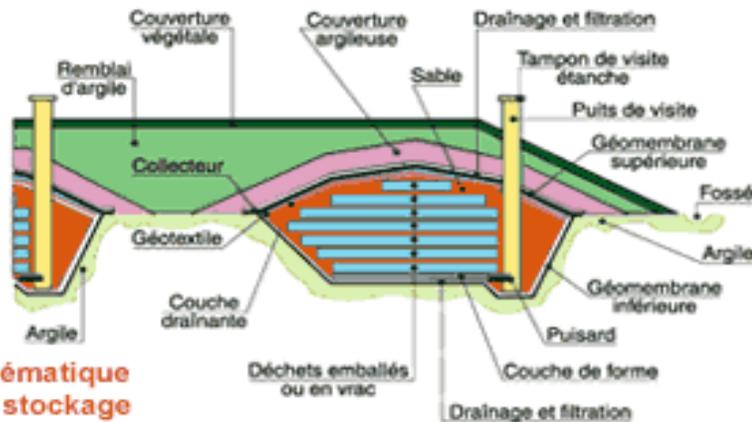


Capacité CSA ~1 million de m³

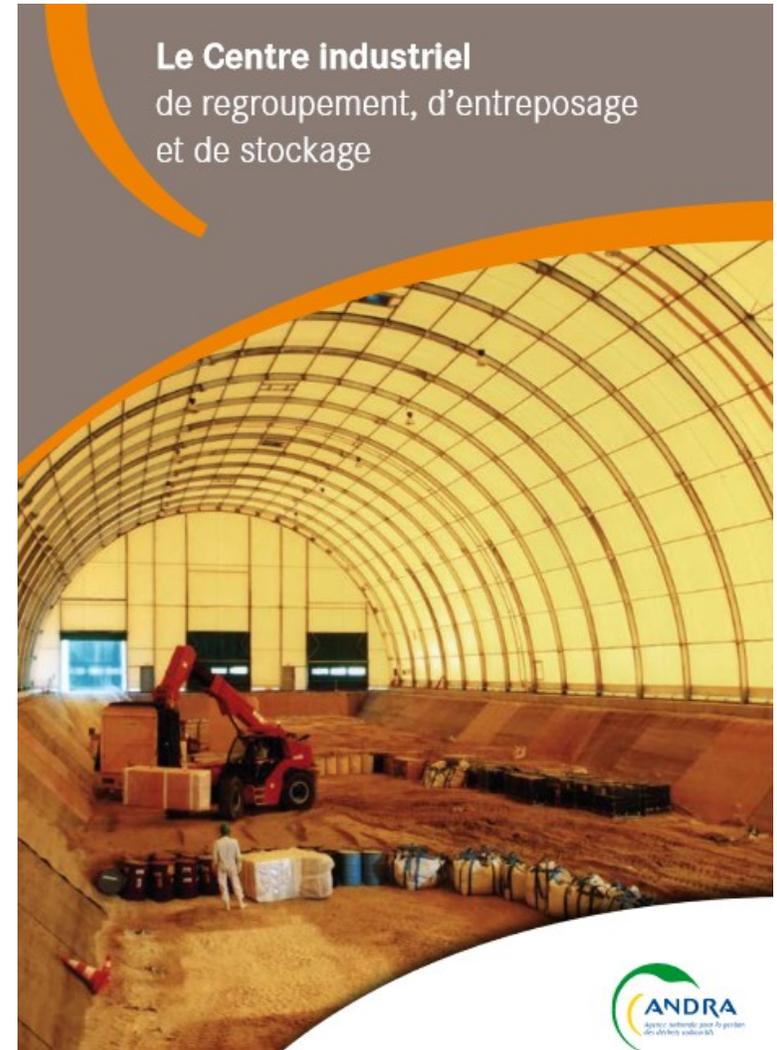


Déchets de Très Faible Activité (TFA)

- Volume : 1 à 2 millions de m³
- Niveau d'activité : qq dizaines de Bq/g
- Conditionnés en caissons métalliques ou en big-bag
- Centre de stockage de l'ANDRA à Morvilliers
 - Ouverture le 14 août 2003



Coupe schématique d'une alvéole de stockage



Les déchets ultimes du retraitement : récapitulatif

- La solution de produit de fission qui contient aussi les actinides mineurs et environ 0.1% de l'U et du Pu, est **vitrifiée**,
- Les coques et embouts sont rincés puis **compactés**
- Les déchets technologiques sont **cimentés**



Le volume annuel de déchets produit par le retraitement du combustible d'un réacteur de 1GWe est :

- 2.5 m³ de déchets de haute activité (verre)
- 5 m³ de déchets de moyenne activité
(principalement gaines métalliques compactées)
- 12 m³ de déchets de faible activité (cimentés)



Les 3 principales classes de déchets

Type	% du volume	activité	m ³ cumulés jusqu'en 2020
A (FMA-VC)	95%	<0,1%	1 200 000
B MAVL	qq %	2%	55 000
C HAVL	qq %	98%	3 600

Inventaire des déchets nucléaires

L'Andra est chargée par la loi du 28 juin 2006 de publier l'Inventaire national des matières et déchets radioactifs.

Il permet le recensement et la localisation de l'ensemble des déchets radioactifs présents en France.

Mis à jour tous les trois ans le dernier date de 2018

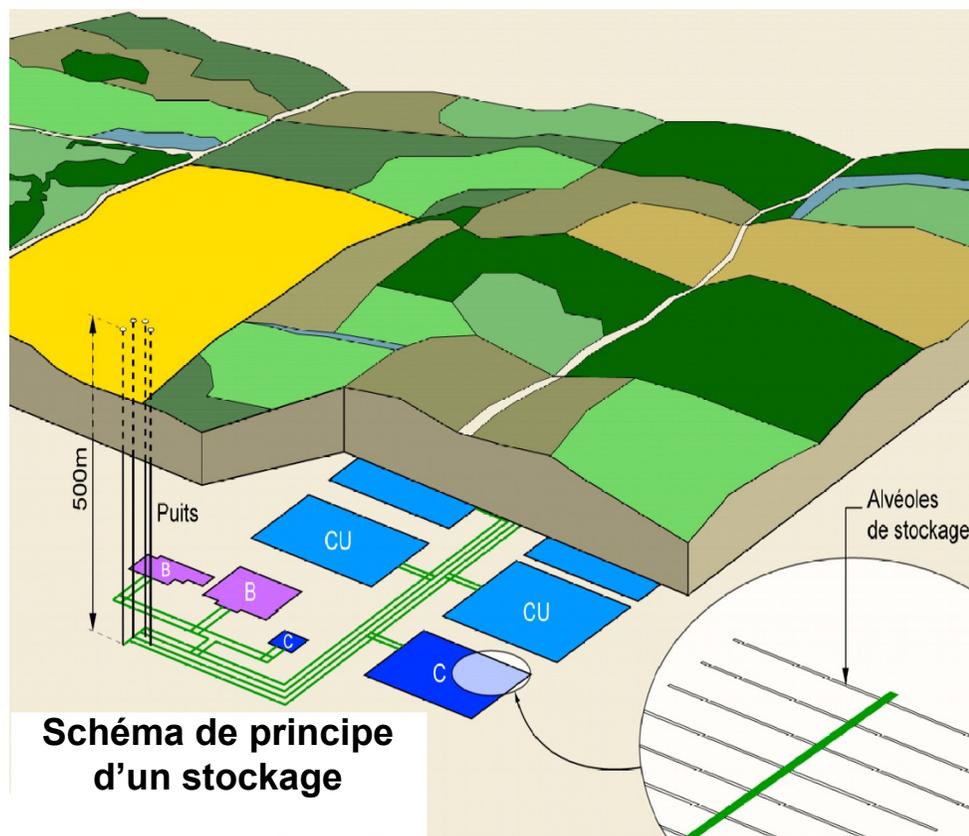
► BILAN ET ÉVOLUTION DES VOLUMES (m³) DE DÉCHETS DÉJÀ STOCKÉS OU DESTINÉS À ÊTRE PRIS EN CHARGE PAR L'ANDRA

Catégorie	À fin 2017	Écart 2017-2016
HA	3 740	+ 90
MA-VL	42 800	- 2 200
FA-VL	93 600	+ 3 100
FMA-VC	938 000	+ 21 000
TFA	537 000	+ 55 000
DSF	1 770	- 30
Total	~ 1 620 000	~ + 80 000

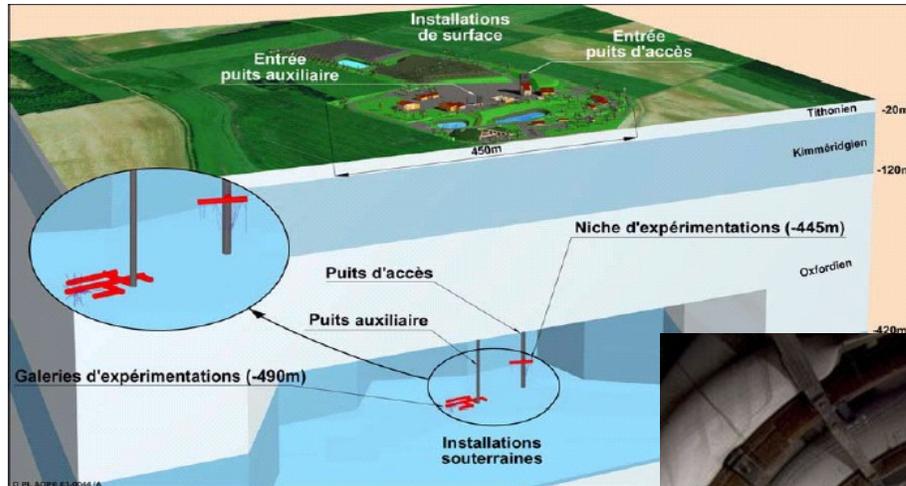
Les écarts ont été calculés sur la base des chiffres exacts puis arrondis.

Stockage en couches géologiques profondes

Le stockage géologique est la voie de référence
pour la gestion définitive des déchets HA et MA-VL
Loi de Juin 2006



Le Laboratoire ANDRA (LSR) de Meuse/Haute-Marne

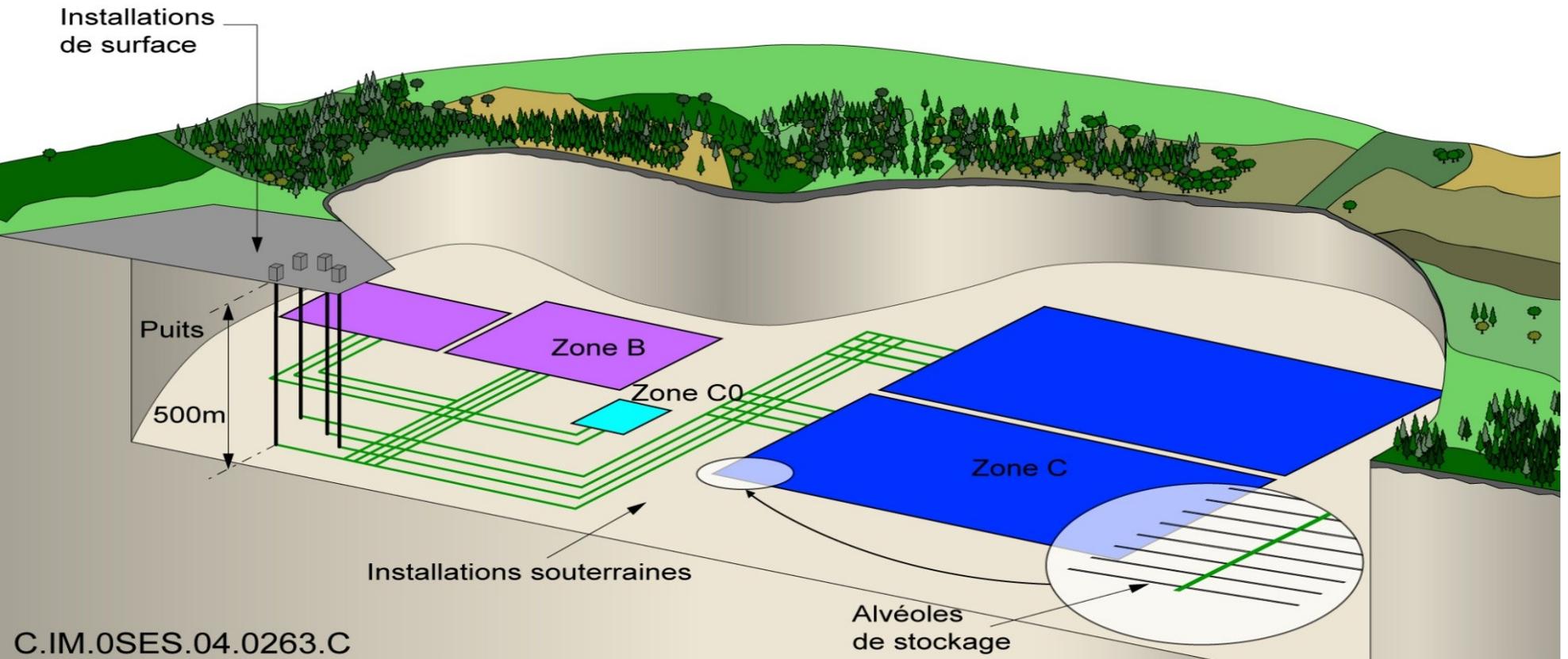


Coupe géologique 3D du site



Un laboratoire à 500 m de profondeur dans une couche d'argile de 130 m d'épaisseur.

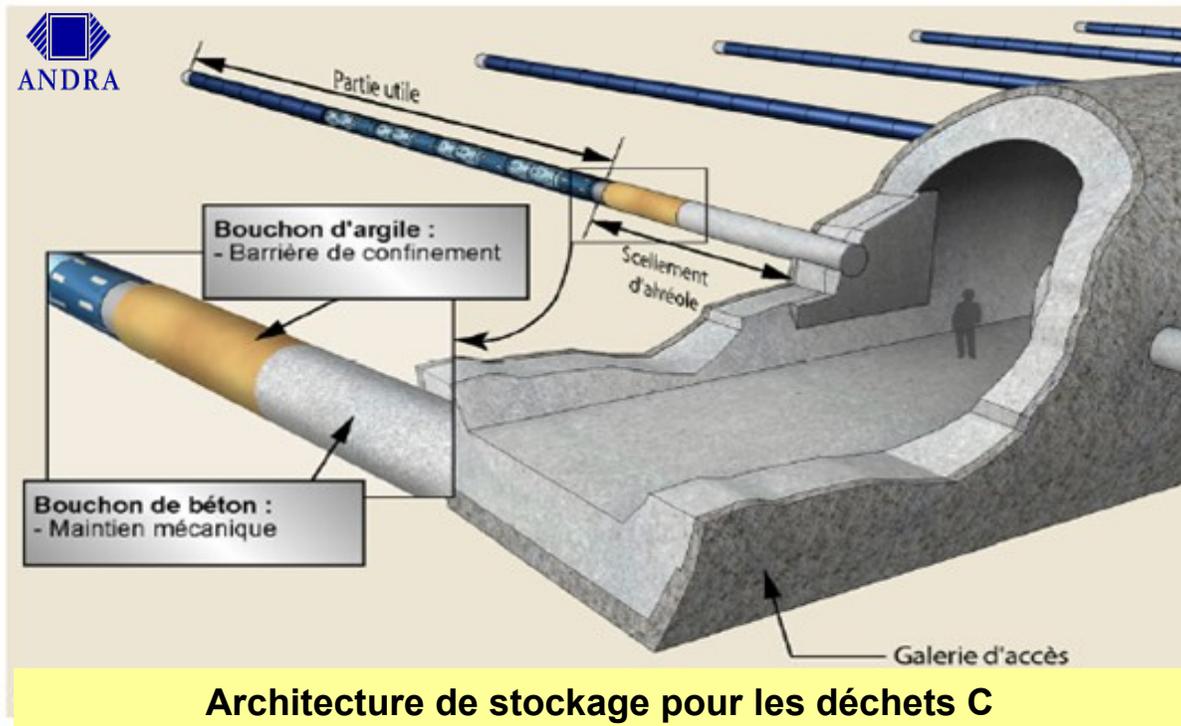
Stockage : une architecture modulaire



Source Andra, dossier argile 2005

Ingénierie des architectures (Callovo-Oxfordien)

⇒ Une architecture à optimiser mais qui déjà permet de satisfaire aux critères de sûreté :



Disposition des alvéoles en cul de sac

Architecture modulaire

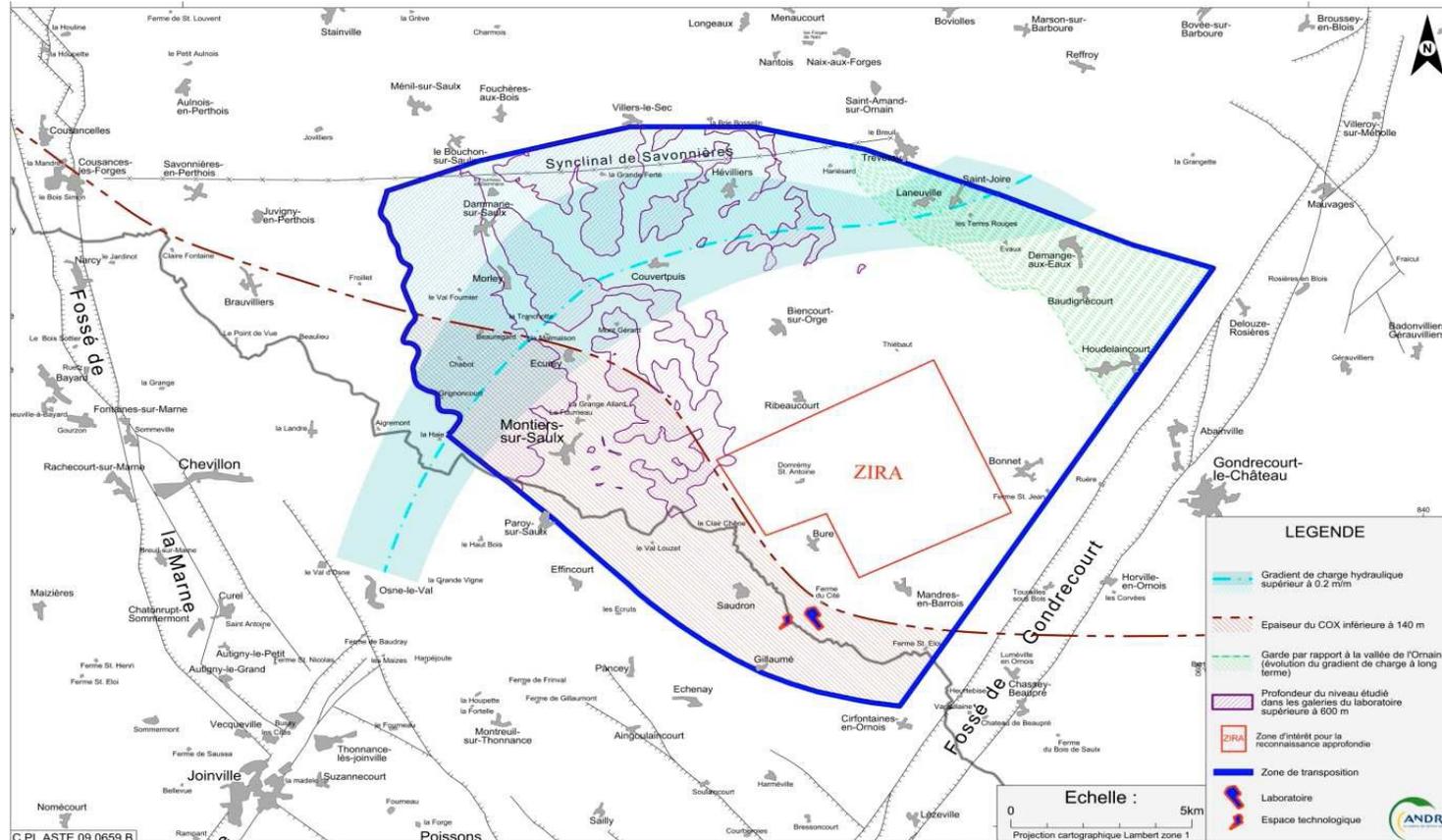
Module spécifique selon le type de colis

La réversibilité a été considérée

Source Andra, dossier argile 2005



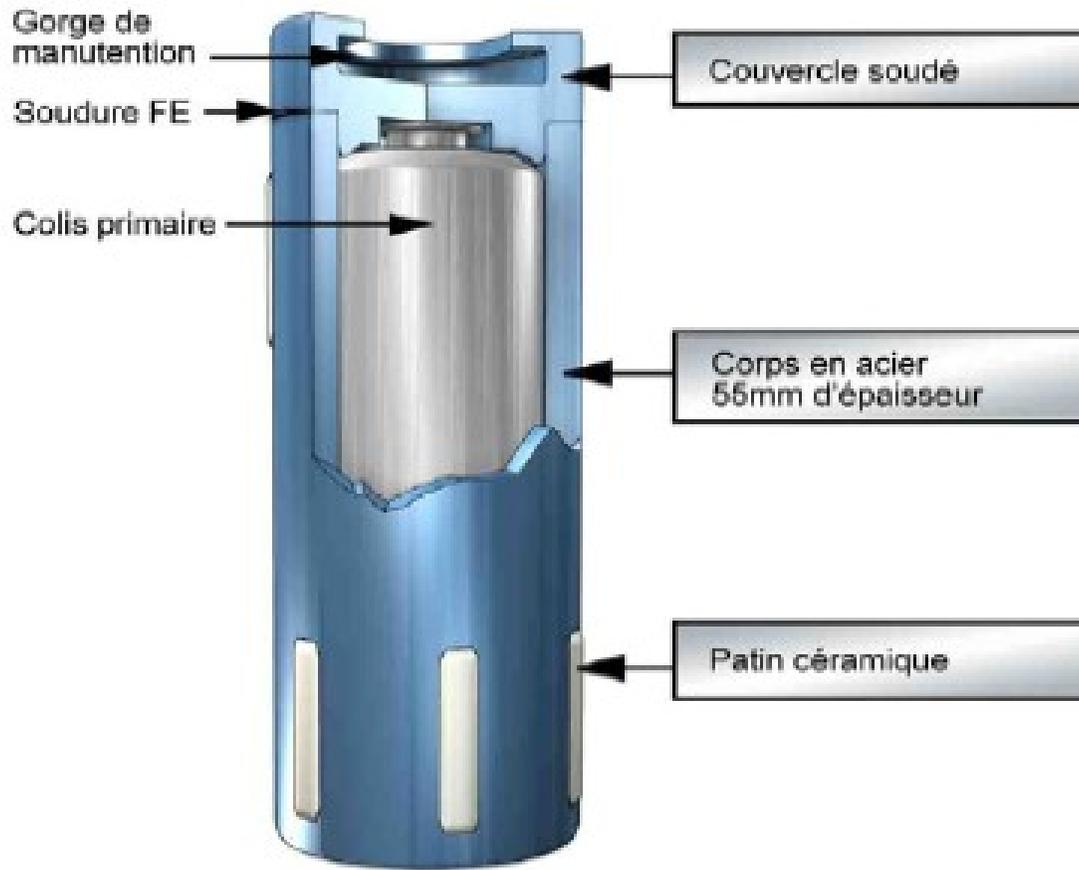
Du Labo souterrain (2000) à la ZIRA (2009)



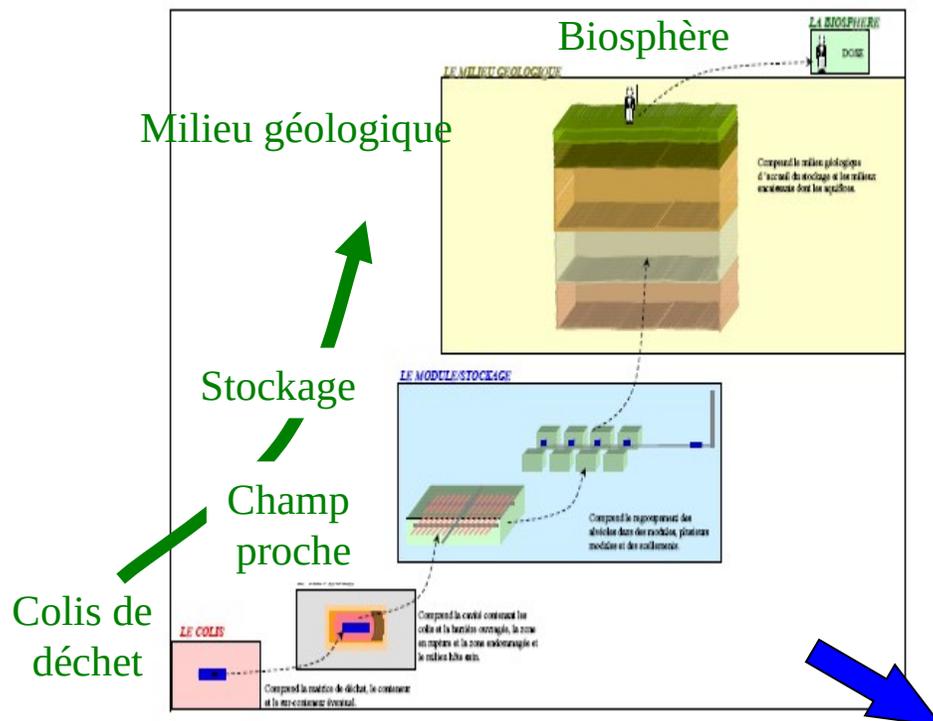
ZIRA : zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie



Le colis HAVL

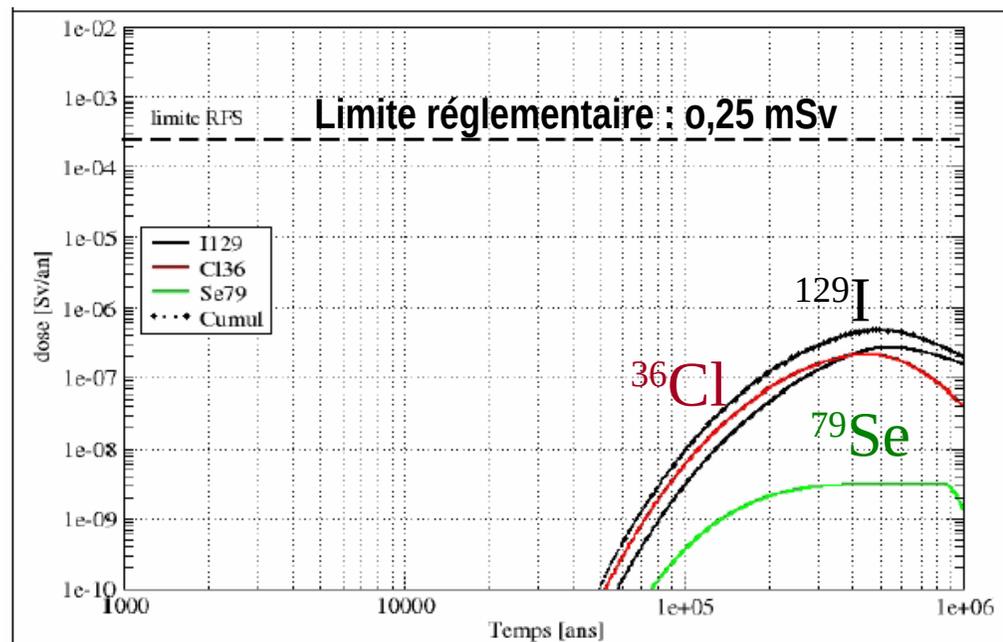


La sûreté du stockage géologique est démontrée



Objectifs des études de sûreté

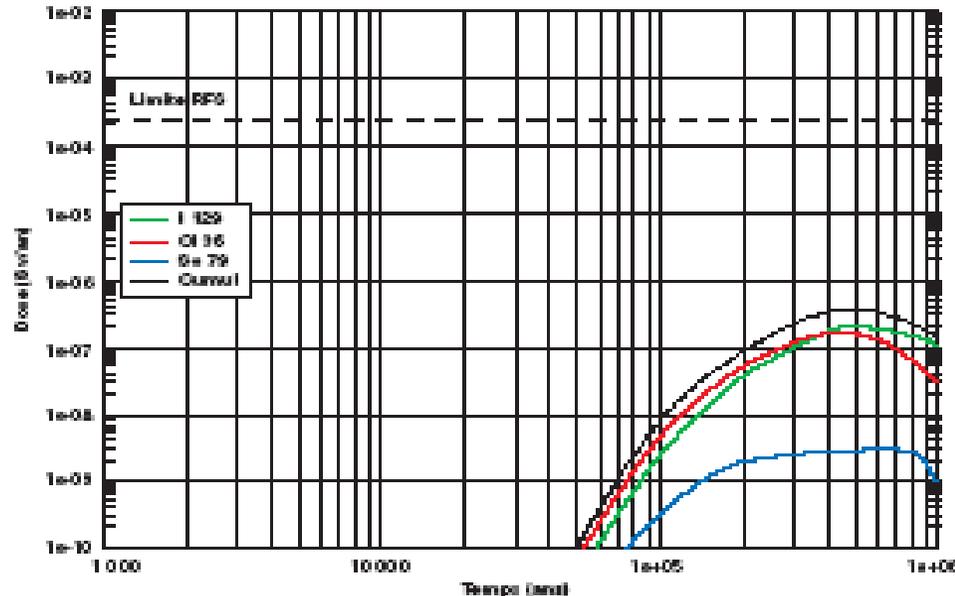
- Déterminer l'impact des RN critiques sur la population critique
- Approche conservative (majorante)
 - Scénario d'évolution normale
 - Scénarii altérés



Une approche intégrée en « poupées russes »

Calculs de sûreté Andra 2005

Cas des verres



Evolution de la dose à l'exutoire (Saulx)

Scénario d'évolution normal :

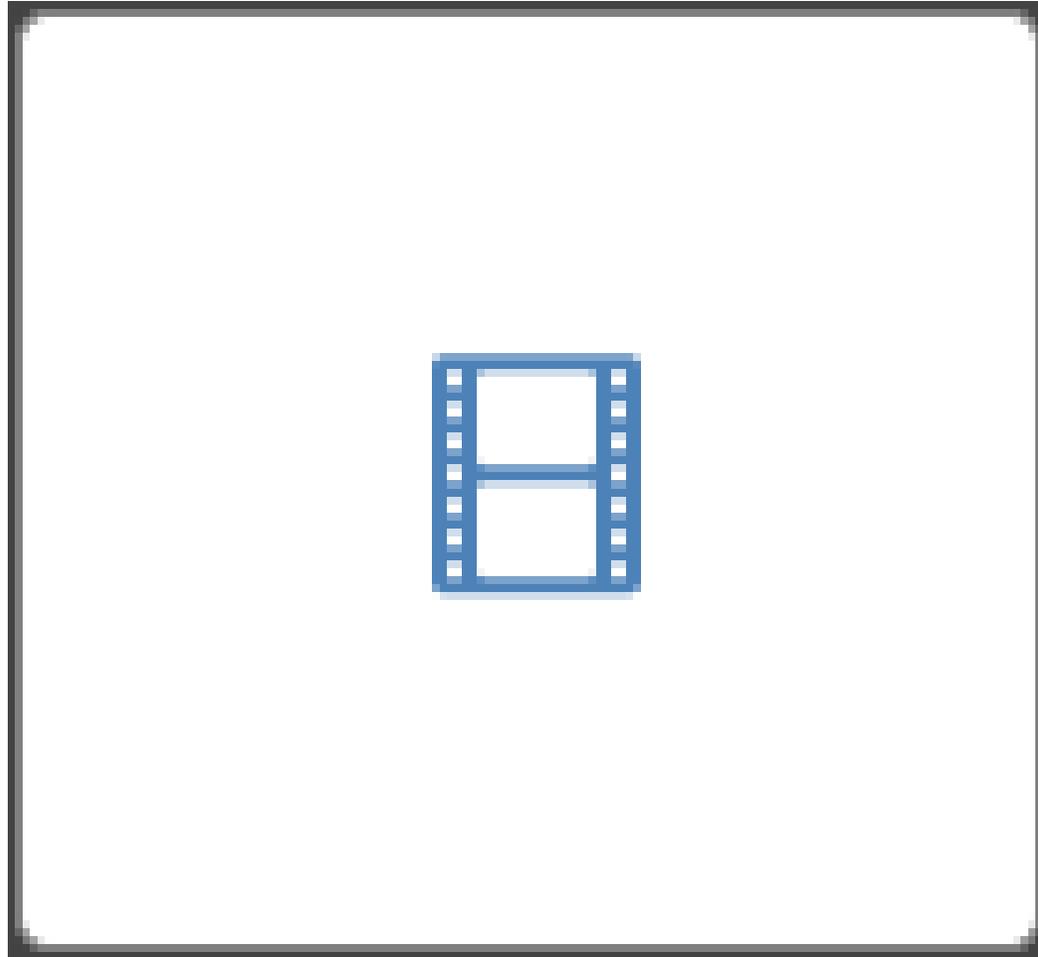
Toujours très inférieur à la
Limite réglementaire de 0,25 mSv

Modèle hydrogéologique à l'actuel

	Dose cumulée maximale (mSv/an)	Date de la dose maximale (ans)
Tous déchets B scénario S1b	0,00047	370 000
Tous déchets C (C0, C1+C2 scénario S1b, C3+C4 scénario S1a)	0,0008	550 000
Combustibles CU1+CU2 scénario S2	0,022	410 000
Combustibles CU3	0,000073	400 000

Source : Dossier 2005 Argile, Andra

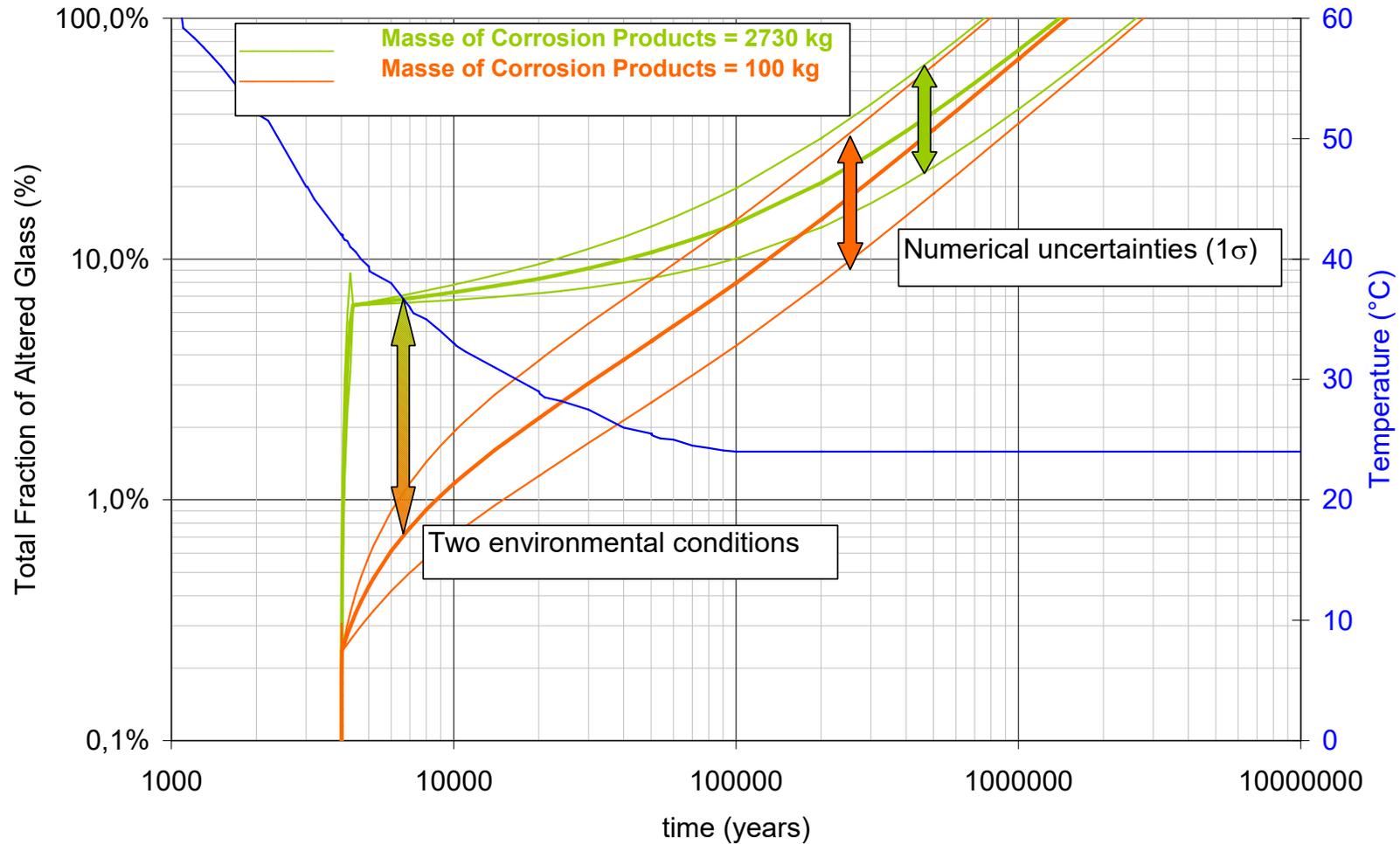
Simulation par Dynamique Moléculaire des effets d'irradiation dans le verre



Si: gilded
O: red
B: green;
Na: blue
Zr: chestnut
Al: grey
U: sky blue

Le verre : un matériau auto-réparant !

R7T7 performance : a sensitivity study



Conclusions CLT des Verres

- La vitrification des solutions de produits de fissions fonctionne en France de façon industrielle depuis 1978, sans problèmes majeurs :
 - Quelques 19 000 conteneurs ont été produits, vitrifiant plus de 4 Milliards de Curies.
- Le très bon comportement à long terme du verre R7T7 est démontré :
 - Aucune dévitrification du verre n'est attendue sur le long terme.
 - Aucun effet néfaste de l'auto-irradiation sur ses performances.
 - Dans des conditions de stockage géologique, la cinétique d'altération du verre par l'eau est très lente et la quantité de verre altérée après 10 000 ans sera de l'ordre du %, et restera très inférieure au % si les sites de sorption de la BO sont saturés avec quelques % de verre inactif.

Combien coûte la gestion des déchets ?

Des coûts bruts très élevés

- Recherches (Loi Bataille) : 2,5 Mds €
- Stockage géologique : 16 - 24 Mds € (2005) -> 36 Mds € (2011)
- Démantèlement du parc : 20 à 39 Mds €

Mais qu'il faut relativiser

Pour environ 16 000 milliards de kWh produits (en 40 ans)

- Coût aval du cycle : 0,0016 € / kWh soit 5 % du prix de revient de l'électricité
- Coût démantèlement : 0,0014 € / kWh

Sources : Rapport de la Cour des Comptes 2005, 2012
Bertel et Naudet, L'économie de l'énergie nucléaire, EDP Sciences, 2004

Conclusions :

Les déchets nucléaires on sait quoi en faire !

- Des traitements « high-tech » ont été développés et optimisés pour chaque catégorie de déchets.
- Ils sont aujourd'hui disponibles à un coût abordable pour la société.
- Ce coût est pris en compte dans le prix du kWh et provisionné par EDF.
- Toutes les études nationales et internationales démontrent qu'avec des traitements adaptés, l'impact environnemental des déchets nucléaires restera négligeable, y compris à long terme.

Pour en savoir plus ...le « Visiatome » à Marcoule



VOIR, COMPRENDRE, DÉ

le **VISIATOME**[®]
Marcoule

parcours de découverte et d'information sur la radioactivité et son devenir

tél. 04 66 39 78 78 / www.visiatome.fr



Des recommandations de l'OMS extrêmement prudentes

Par exemple ;

Valeur seuil OMS en tritium pour l'eau potable : 10 000 Bq/l

Si l'on boit 2 litres d'eau par jour, à cette concentration,
365 jours par an, on aura pris une dose de 0.1 mSv / an !

Seuil d'alerte à 100 Bq/l :

→ permet de détecter un problème 100 fois avant un dépassement réglementaire et 100 000 fois avant un problème sanitaire avéré !



Quelle industrie fait aussi bien ?

Rappel : l'activité naturelle en tritium du Rhône est de 10 Bq/l.
Avec un débit moyen de 1500 m³/s, c'est 15 millions de Bq de
Tritium qui passe devant Marcoule naturellement chaque
seconde.

Les alternatives au nucléaire

- La France, contrairement à nombre de ses voisins, n'a pratiquement **pas de matières premières énergétiques** dans le sous – sol (*Peut être du gaz de schiste mais la loi actuelle fait que même ce potentiel n'est pas analysable...*).
- Les énergies renouvelables ne pourront remplacer le nucléaire que de façon marginale, plus encore du fait de leur intermittence que de leur coût élevé.
- La sortie du nucléaire conduirait inexorablement à accroître notre dépendance aux énergies fossiles, comme c'est le cas actuellement en Allemagne, à augmenter les rejets de gaz à effet de serre, et à augmenter la dette du pays.
 - Facture pétrole + gaz en 2012 : 70 Milliards = déficit de la France
 - Coût des énergies renouvelables :
 - par ex en Allemagne 110 Milliards d 'Euros investis dans le solaire PV → 4 % de leur électricité ; éolien 8%

L'énergie, une chance ou un danger ?

« Le meilleur kWh est celui qui n'a pas été produit, ou qui n'est pas consommé »

Ce slogan est accrocheur, mais aussi manipulateur.

Il nous pousse à nous tromper de combat :

L'énergie, c'est-à-dire la chaleur, la lumière, le travail mécanique (machines, voitures, etc...), nous est utile et nous rend la vie plus facile et plus agréable.

C'est l'accès à une l'énergie abondante et peu chère qui a permis l'extraordinaire augmentation de notre espérance de vie !

On pourrait aussi dire :

“le meilleur livre est celui qui n'a pas été écrit, ou que vous n'avez pas lu”,

Ce n'est pas l'énergie, ce sont les nuisances et les gaspillages qu'il faut réduire.

Jean-François Dupont Ingénieur-physicien EPFL

<http://www.lesobservateurs.ch/2013/05/24/le-slogan-manipulateur-du-meilleur-kwh/>

CLASSIFICATION DES DÉCHETS RADIOACTIFS ET FILIÈRES DE GESTION ASSOCIÉES

Catégorie	Déchets dits à vie très courte	Déchets dits à vie courte	Déchets dits à vie longue
Très faible activité (TFA)	 Gestion par décroissance radioactive	 Stockage de surface (Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage)	 Stockage à faible profondeur à l'étude
Faible activité (FA)		 Stockage de surface (centres de stockage de l'Aube et de la Manche)	
Moyenne activité (MA)		 Stockage géologique profond en projet (projet Cigéo)	
Haute activité (HA)	Non applicable		

https://inventaire.andra.fr/sites/default/files/documents/pdf/fr/andra-les_essentiels-2018.pdf