

# SCIENCES DU DÉMANTÈLEMENT DES INSTALLATIONS NUCLÉAIRES

*8 et 9 Octobre 2014*

## Historique et positionnement

*Robert Dautray, Yves Bréchet*

# Plan

---

- 1. Enjeux du démantèlement**
- 2. Inventaires des radionucléides et des déchets**
- 3. Techniques de démantèlement**
- 4. Gestion des déchets**
- 5. Organisation du chantier**
- 6. Conclusion**

---

## 1. Enjeux du démantèlement

- i. Le vieillissement du parc électronucléaire mondial
- ii. Les spécificités du parc électronucléaire français
- iii. Les opérations de démantèlement en cours en France
- iv. Profiter de l'homogénéité du parc EN français
- v. Opérations de démantèlement dans le monde
- vi. L'exemple britannique
- vii. Le cas des centrales endommagées

## 2. Inventaires des RN et déchets

## 3. Techniques de démantèlement

## 4. Gestion des déchets

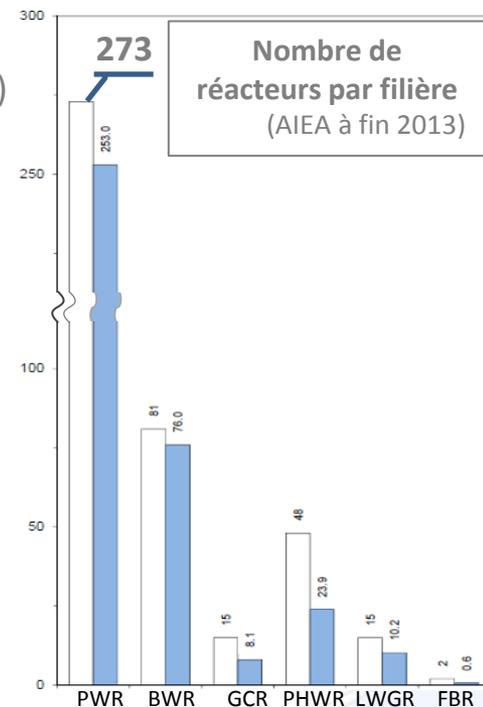
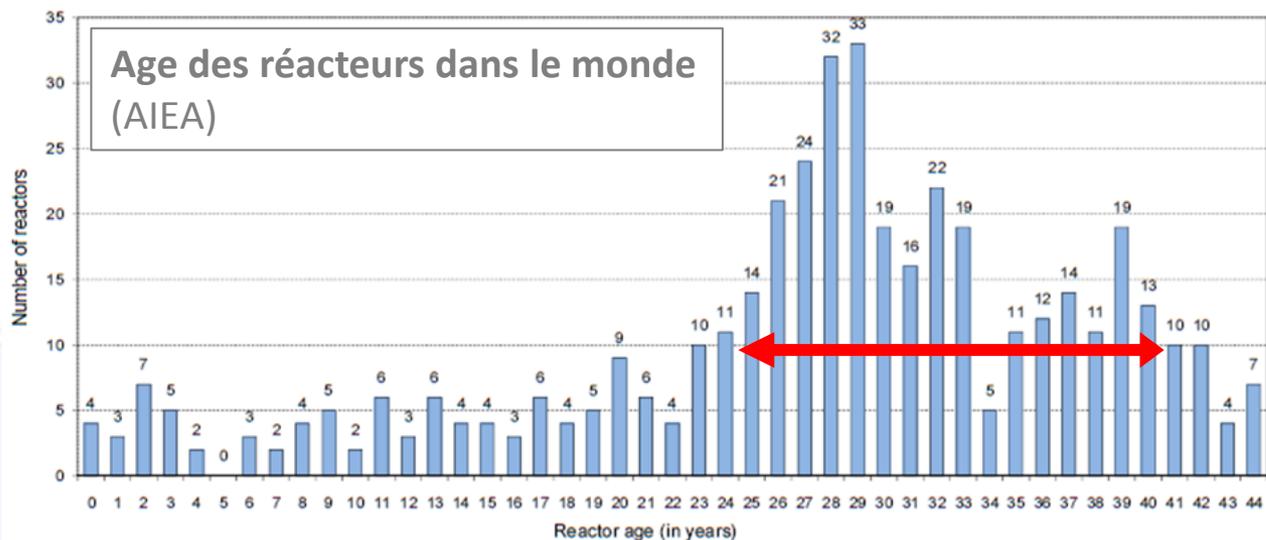
## 5. Organisation du chantier

## 6. Conclusion

# Le vieillissement du parc électronucléaire mondial

Réacteurs actuellement arrêtés ou en démantèlement dans le monde

- 149 réacteurs électronucléaires (400 prévus en 2050 selon OCDE/NEA)
- près de 500 réacteurs de recherche



La majorité de réacteurs électronucléaire dans le monde ont entre 25 et 40 ans  
⇒ Démantèlement dans les **10 à 30 ans** à venir

**Enjeu :** traiter le démantèlement à l'échelle industrielle afin d'en minimiser les coûts

# Les spécificités du parc électronucléaire françaises

Les **58 réacteurs électronucléaires** français sont de conception similaire :

1. Construction **groupée sur une courte période**  
→ les démantèlements seront aussi groupés
2. Deux **familles homogènes** : 900 MWé et 1300 Mwé  
→ Mêmes parties caloporteurs, contrôle/commande, chargement/déchargement, chimie, corrosion
3. **Même cycle de combustibles**  
→ retraitement à l'usine de La Hague, extraction du plutonium

⇒ Concevoir **globalement** le démantèlement des 58 réacteurs

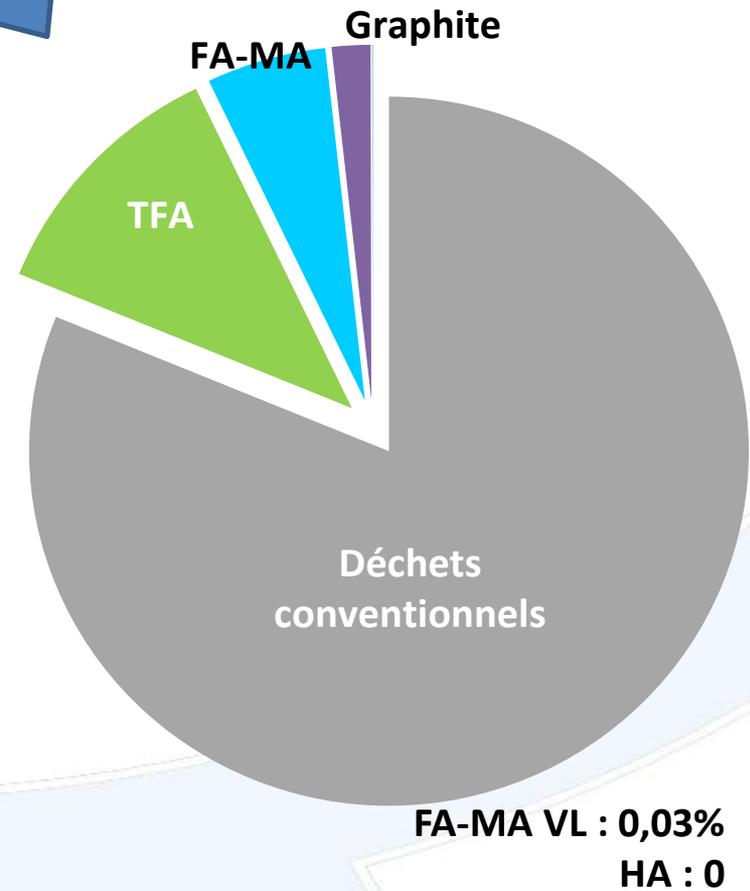
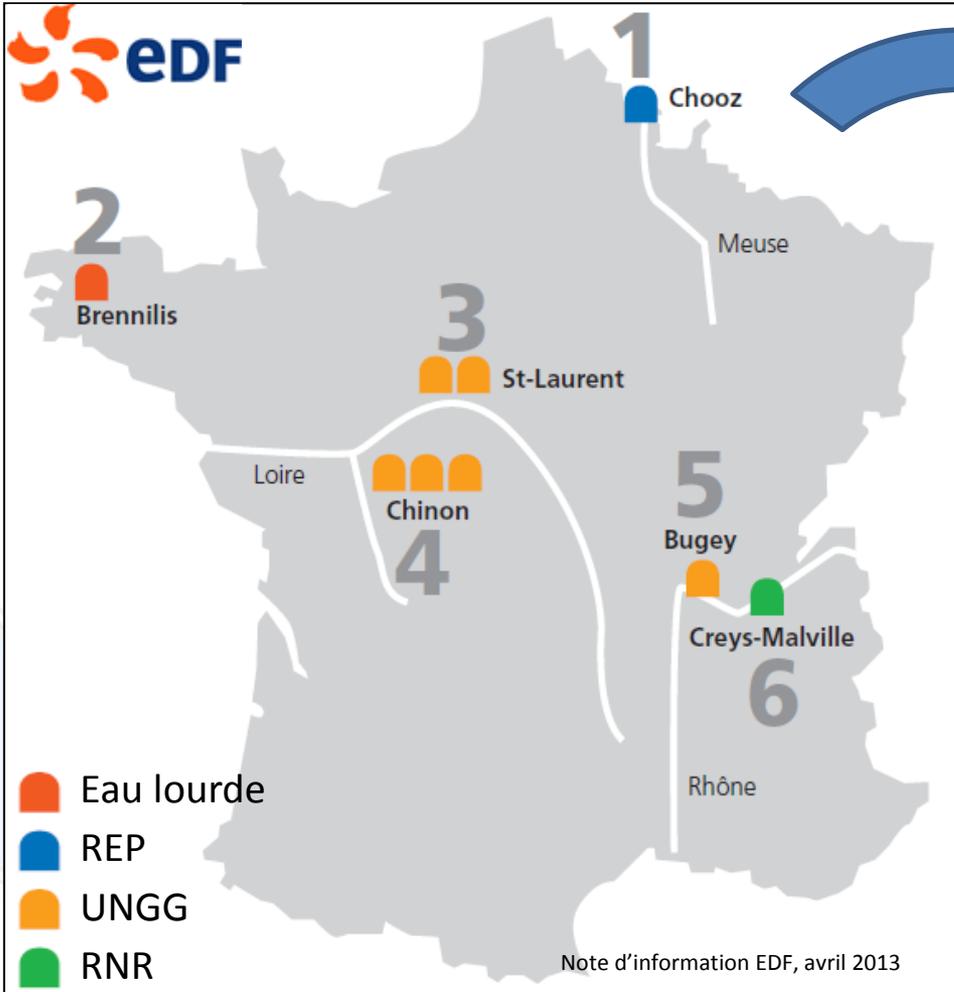
Chinon-1



Or, l'expérience actuelle du démantèlement repose sur des têtes de séries ou des prototypes industriels :

- ne constitue **pas forcément** une expérience **transposable** aux réacteurs à démanteler dans les années à venir
- le programme électronucléaire de chaque pays comporte des spécificités : **les techniques de démantèlement doivent être adaptées** pour chacun

# Les opérations de démantèlement en cours en France



Réacteurs en cours de démantèlement :

- **Neuf réacteurs** électronucléaires d'EDF
- **Quatre réacteurs** exploités par le CEA : G1, G2, G3 et Phenix

# Profiter de l'homogénéité du parc français

- Traiter **simultanément** l'ordonnancement de tous les chantiers
  - des outils, des grands équipements, des grandes infrastructures (appareils de levage, de manipulation, de transports, de robotique, calcul scientifique, etc.).
- **Harmoniser** les activités de démantèlement
  - cycle de combustible, enfouissement des déchets, Défense nationale, hôpitaux (radiothérapie), etc.
- Distinguer les **activités sur site** des activités dans des unités communes
  - usines de fabrication des colis radioactifs, d'encapsulation de fermeture des colis, etc.
- Réduire le nombre de catégories de **conteneurs** et les standardiser
- **Profiter de l'expérience** des chantiers précédents
  - réduction des risques, sécurité, sureté passive, maîtrise des délais, respect de l'environnement, coût, etc.

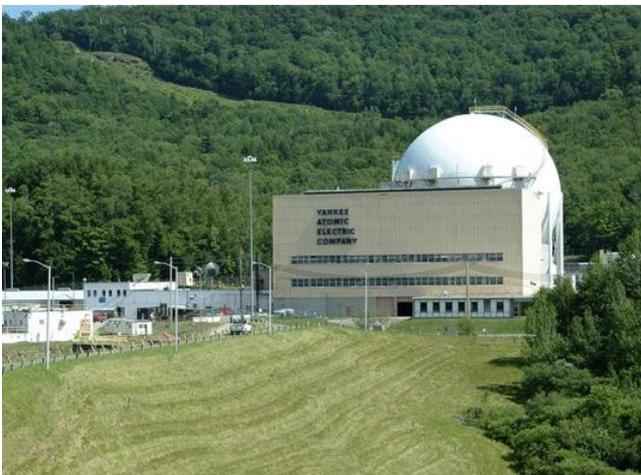
Gravelines

⇒ se doter d'une **stratégie** de démantèlement



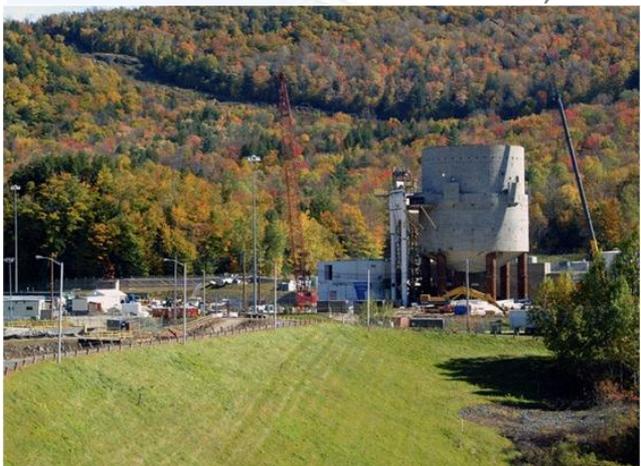
# Les opérations de démantèlement dans le monde

149 réacteurs en arrêt définitif dans le monde fin 2013  
**119** dont le **démantèlement est en cours**  
**6** réacteurs dont le **démantèlement est terminé**  
(tous aux États-Unis)



Yankee Rowe, USA

Avant



Après



Avant

Winfrith, UK

Après



# L'exemple britannique

## Mise en place d'une Nuclear Decommissioning Authority (NDA, organisme public)

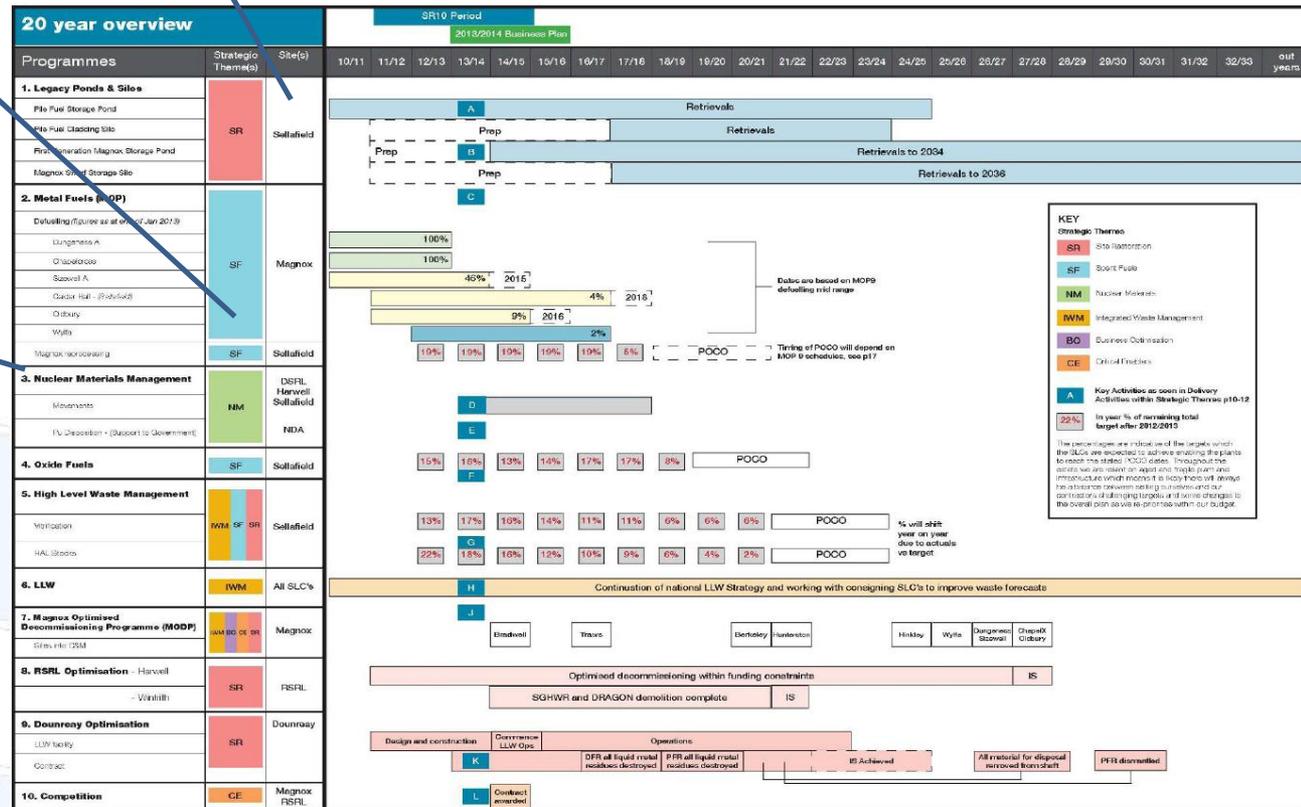
- superviser et gérer le démantèlement des sites nucléaires publics
- gérer le transport des matières nucléaires
- apporter une expertise pour le démantèlement des réacteurs de puissance

Les axes stratégiques

Les sites

Catégories de matériaux

## Planification d'ensemble des chantiers de démantèlement UK 2010-2033



# Le cas des centrales endommagées

Spécificités de ces démantèlements :

1. Le combustible est toujours présent dans le réacteur à démanteler
2. Des problèmes d'accessibilité liés à l'endommagement des bâtiments

Fukushima Dai-ichi



---

## 1. Enjeux du démantèlement

## 2. Inventaire des radionucléides et des déchets

- i. Le terme source de radioactivité
- ii. Les radionucléides dans les structures
- iii. Le problème spécifique du graphite
- iv. Cycle et démantèlement : deux questions profondément différentes
- v. Les déchets nucléaires issus du démantèlement

## 3. Techniques de démantèlement

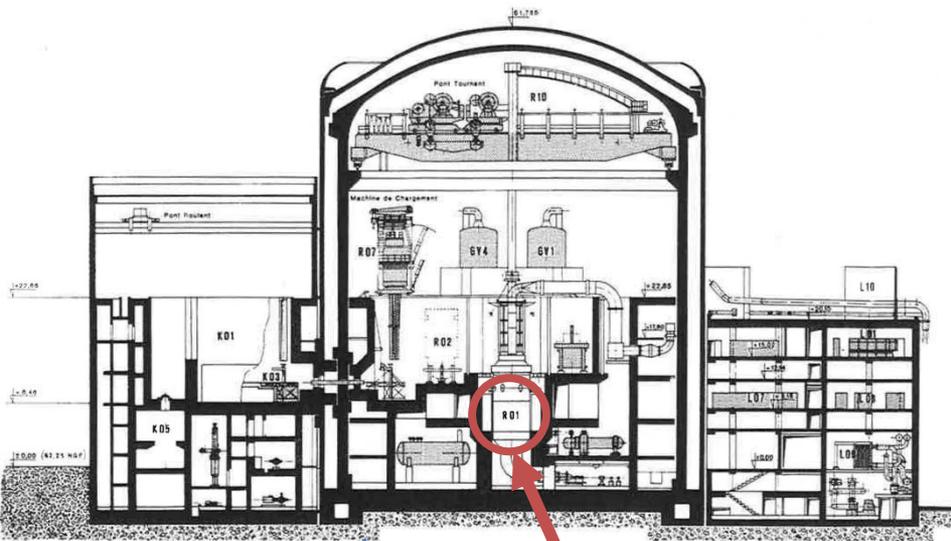
## 4. Gestion des déchets

## 5. Organisation du chantier

## 6. Conclusion

# Le terme source de radioactivité

Bilan neutronique d'un REP  
Techniques de l'ingénieur  
Caractéristiques neutroniques  
des réacteurs industriels, 1992



BÂTIMENT COMBUSTIBLE

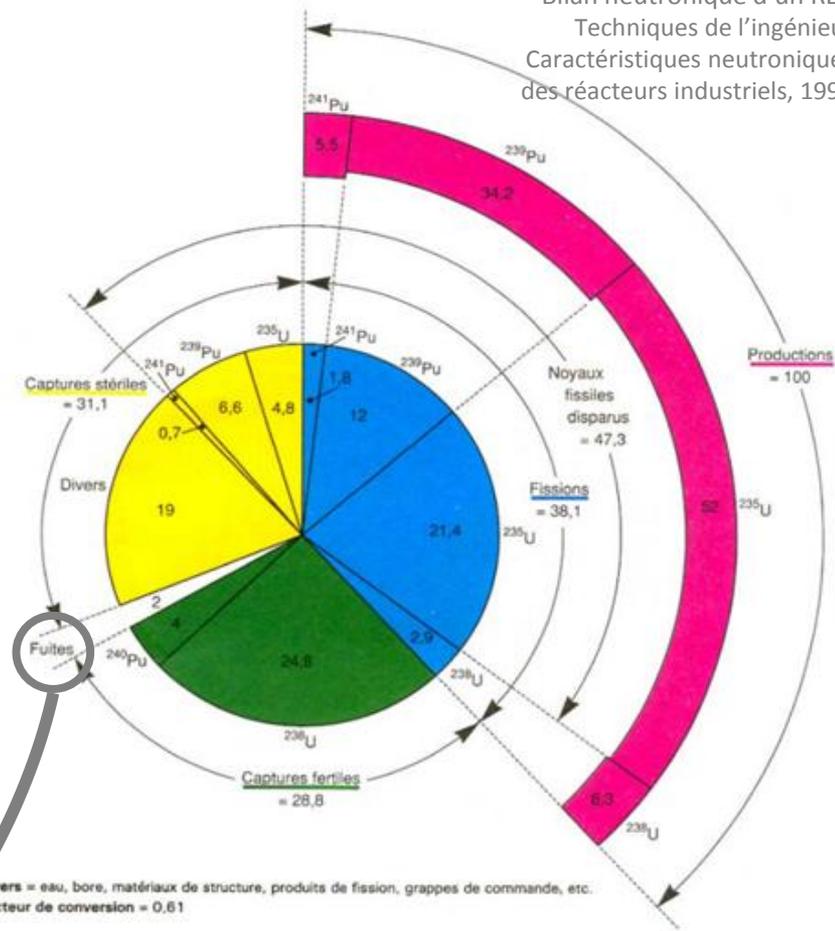
BÂTIMENT RÉACTEUR

BÂTIMENT ÉLECTRIQUE ET DES  
AUXILIAIRES DE SAUVEGARDE

**Combustible du cœur :**  
qlq tonnes  
radioactivité :  $\sim 10^{20}$  Bq

Activation :  
neutrons de  
fuite = 2%

**Structures, hors combustible :**  
 $\sim 100\ 000$  tonnes  
radioactivité :  $\sim 10^{18}$  Bq



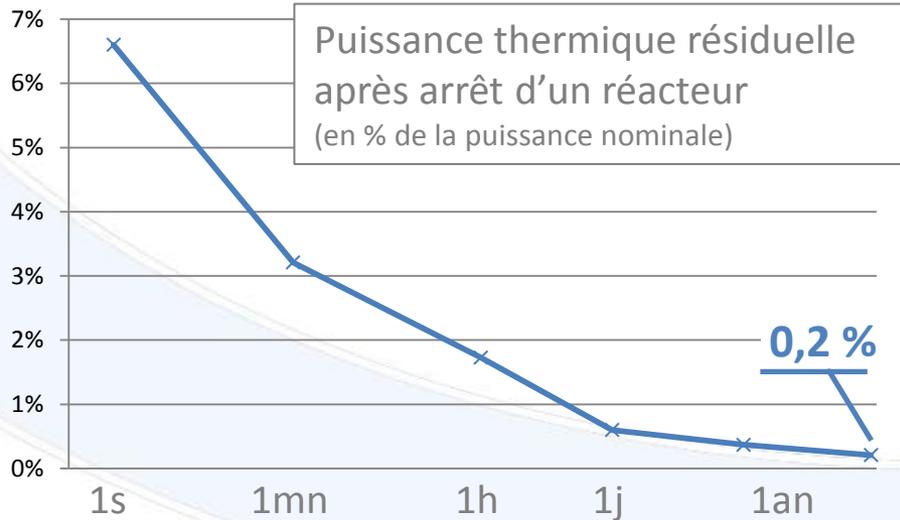
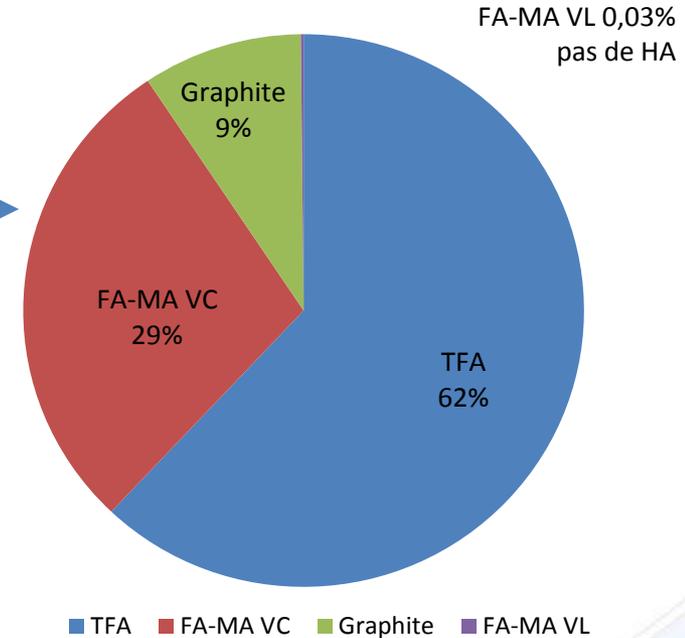
# Les radionucléides dans les structures

Déchets de démantèlement, pour un réacteur\* :

~100 000 tonnes de déchets "conventionnels"

20 000 t de déchets radioactifs (TFA et FA-MA)

$10^{18}$  Becquerels



Période de quelques radionucléides issus du démantèlement :

$^{60}\text{Co}$	5 ans
$^{63}\text{Ni}$	100 ans
$^{59}\text{Ni}$	76 000 ans
$^{94}\text{Nb}$	20 300 ans
$^{53}\text{Mn}$	3 700 000 ans
$^{93}\text{Mo}$	4 000 ans
$^{36}\text{Cl}$ (UNGG)	301 000 ans

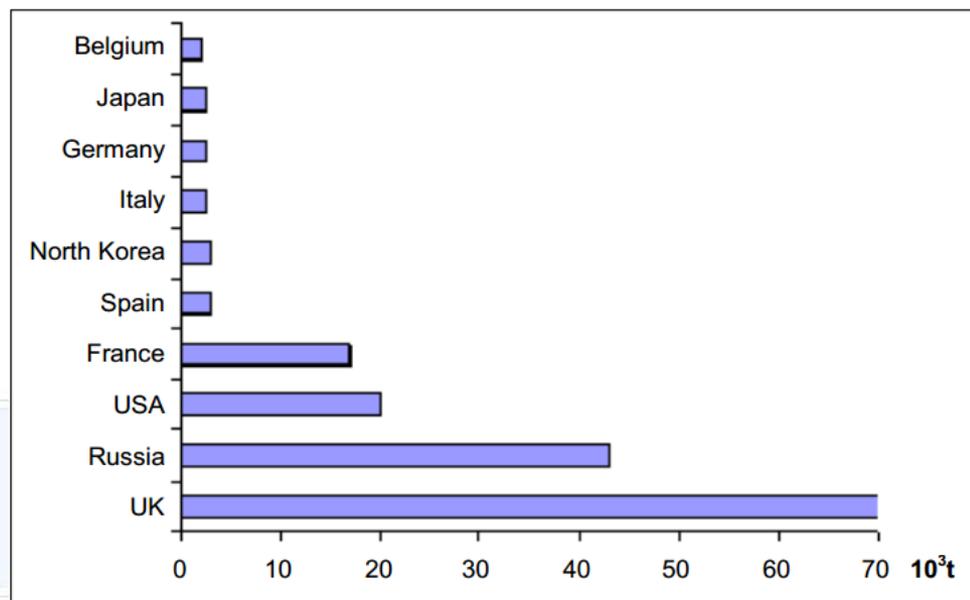
\* moyenne sur les 9 réacteurs en cours de démantèlement par EDF

# Le problème spécifique du graphite

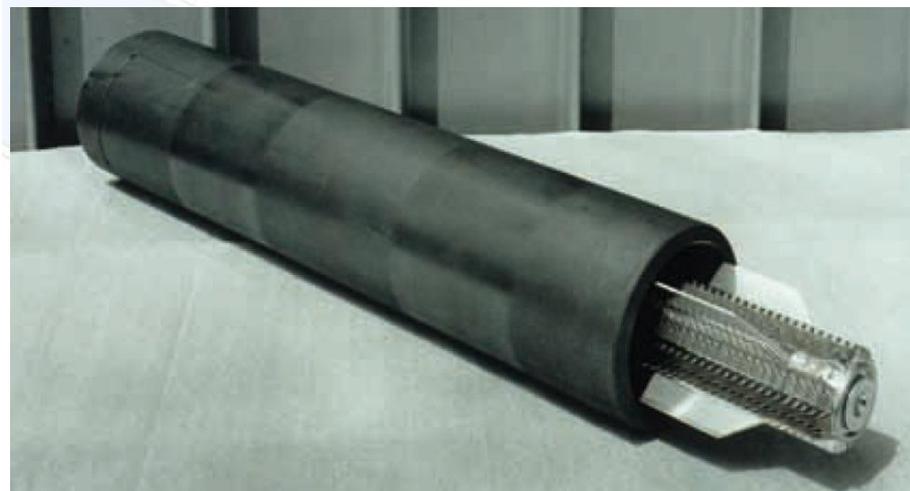
Problème **non anticipé** au début des programmes nucléaires au Royaume-Uni, aux États-Unis, en URSS, en France, en Espagne dans les années 50

→ le graphite contient des **impuretés activées** par les flux neutroniques du cœur  
tritium,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{41}\text{Ca}$ ,  $^{55}\text{Fe}$ ,  $^{63}\text{Ni}$ ,  $^{60}\text{Co}$

**Un problème mondial** : les inventaires considérables de graphite



Lee, RSC 2006



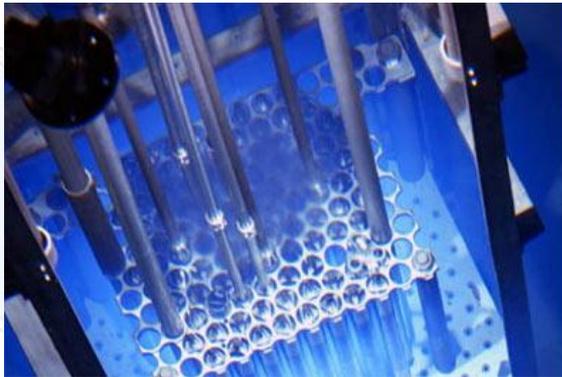
Chemise graphite, réacteur UNGG, Andra

# Cycle et démantèlement : deux questions profondément différentes

## Cycle du combustible

produits de fission, transuranides  
→ radionucléides à longue durée de vie

des problèmes dominés par la  
radioactivité  $\alpha$



## Démantèlement

produits d'activation  
→ radionucléides à durée de vie courte  
ou moyenne

des problèmes dominés par la  
radioactivité  $\beta$  et  $\gamma$



Connecticut Yankee, USA

Des **analogies** :

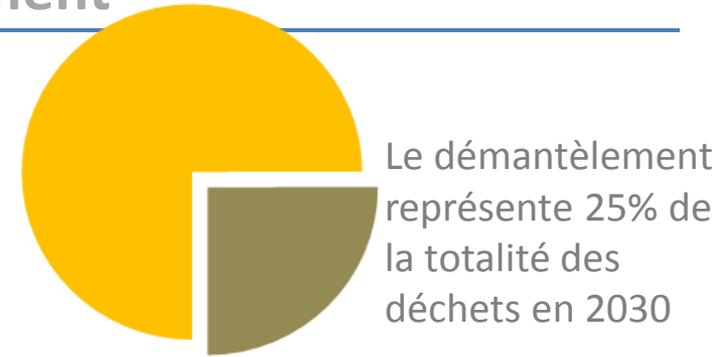
Normes de radioprotection

Types de conteneurs

...

# Les déchets nucléaires issus du démantèlement

Évaluation Andra des **volumes de déchets en 2030**  
(totalité des déchets de la filière nucléaire)



Totalité des déchets nucléaires...

HA : 0,2%

MA-VL  
2%

FA-VL  
5%

TFA  
48%

FMA-VC  
45%

■ HA ■ MA-VL ■ FA-VL ■ FMA-VC ■ TFA

... donc déchets issus du **démantèlement**

HA : 0

MA-VL  
1%

FA-VL  
6%

TFA  
71%

FMA-VC  
22%

---

1. Enjeux du démantèlement

2. Inventaires des RN et déchets

**3. Techniques de démantèlement**

- i. Les difficultés du démantèlement
- ii. Aspects standards et spécifiques du démantèlement
- iii. Séquence des opérations de démantèlement
- iv. Instruments de mesure et robots de démantèlement

4. Gestion des déchets

5. Organisation du chantier

6. Conclusion

# Les difficultés du démantèlement

---

Deux enjeux technologiques antagonistes

- **CONCENTRER les fonctions**

faciliter les manutentions, le déplacement,  
le transport, l'entreposage

→ favorise **l'exploitation**

- **SÉPARER les fonctions**

faciliter l'accessibilité, la maintenance,  
le démantèlement, ...

→ favorise **le démantèlement**

Pour la filière nucléaire :

**trouver un compromis technique entre exploitation et démantèlement**

# Aspects standards et spécifiques du démantèlement

## Démantèlement d'un réacteur nucléaire :

- des **activités standard** dans toute structure industrielle et de déconstruction :  
Séparer, découper, trier, déplacer, échantillonner, décontaminer, nettoyer
- des **préoccupations spécifiques** au nucléaire :  
Rayonnements ionisants, contamination, dégagements de chaleur, radioprotection

## Un **traitements spécifiques** des éléments à démanteler :

- Matériaux de structure **amovibles** avec les équipements existants  
couvercle, échangeurs de chaleur, pompes, vannes, purgeur,  
barres de contrôle, "pressuriseur", etc.
- Constituants de **structure non amovible**  
cuve, piscine, circuits soudés des fluides, etc.
- **Autres** matériaux radioactifs:  
eau tritiée, graphites contenant du  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{14}\text{C}$

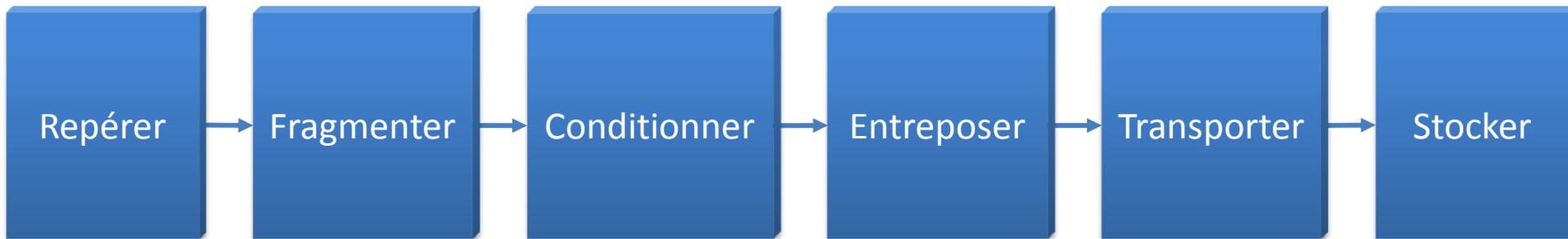
À démonter et transporter avant traitement

Traitement à effectuer sur place

Risques de dégazage ou de fuite

→ Assurer la traçabilité

# Séquence des opérations de démantèlement



## Deux fonctions essentielles :

- Manipuler les matériaux
  - besoin d'appareils de manutention adaptés aux opérations en milieu radioactif, à chaud et pour des matériaux hétérogène
- Contenir tous les résidus et assurer leur séparation
  - besoin de **conteneurs standards**

## Contraintes opérationnelles :

- Évacuer la **chaleur** (sinon évaporations et **réactions chimiques**)
- Absorber les **rayonnements**
- Recueillir les **gaz** et les **fluides** éventuels
  - (⇒ traitement des effluents, résines et filtrats, ...)
- Stocker et retenir parfaitement les **débris radioactifs** (dont la contamination)

# Instruments de mesure et robots de démantèlement

## Les instruments de mesure et de manipulation

1. Visualiser les zones dangereuses
2. Localiser précisément et quantifier la radioactivité
3. Porter les outils et permettre l'action à distance

→ intervenir à la place des hommes en milieu contaminé



Situation spécifique : les interventions en situation accidentelle

---

1. Enjeux du démantèlement

2. Inventaires des RN et déchets

3. Techniques de démantèlement

**4. Gestion des déchets**

- i. Le conditionnement des débris sur site
- ii. Entreposage transitoire sur site
- iii. Conteneurs et capsulation
- iv. Évacuations des débris radioactifs hors du site

5. Organisation du chantier

6. Conclusion

# Le conditionnement des débris sur site

Les débris à conditionner sur le site pour leur évacuation sont :

- Aciers, métaux  
éléments traces pour l'acier :  $^{59}\text{Ni}$ ,  $^{63}\text{Ni}$ , Cr, Ti, Al, Mg, ...
- Éléments de protection biologique
- Bétons  
Si, Al, Ca, K, Mg, C, O, ...
- Graphite (éventuellement)  
élément trace :  $^{36}\text{Cl}$
- Contaminants et résidus de filtration

L'exemple de Chooz A :

- déchets non conditionnés :

**~41 tonnes sur site**

**< 2 GBq**

- déchets conditionnés :

**~300 m<sup>3</sup> sur site**

Déchets ferreux **< 4 GBq**

Plastiques, caoutchouc **< 1 GBq**

Pulvérulents **< 1 GBq**

...

NOM DU SITE : CHOOZ (AD) EXPLOITANT : EDF					
REGION : CHAMPAGNE-ARDENNE DEPARTEMENT : ARDENNES (08) COMMUNE : CHOOZ			SECTEUR ECONOMIQUE : ELECTRONUCLEAIRE		
DESCRIPTION BREVE : Premier réacteur nucléaire REP (de 305 MWe) construit en France, Chooz A est mis en service en 1967. Construit et exploité par EDF et des sociétés belges regroupées dans la « Société Electro Nucléaire des Ardennes » (SENA). Arrêté définitivement en 1991, le réacteur est mis à l'arrêt définitif en 1999. Le démantèlement total des installations est à la charge d'EDF.					
DECHETS				FAMILLES ET VOLUMES	
NATURE DES DECHETS	ACTIVITE	RADIO-NUCLEIDE(S)	CODE FAMILLE	CATEGORIE	Volume conditionné (m <sup>3</sup> )
SITUATION AU: 31/12/2010					
<b>1. Déchets Moyenne Activité à Vie Longue (MA-VL)</b>					
- Crayons source (0,14 t)	68,4 TBq	PA (PF)	S01	-	-
<b>2. Déchets de Moyenne, Faible ou Très Faible Activité à Vie Courte</b>					
a) Déchets non conditionnés					
- Plastiques, caoutchouc (3,44 t)	-	PA (PF)	F3-01	FMA-VC	6,7
- Gravats (8,62 t)	-	PA (PF)	TFA	TFA	9,4
- Liquides organiques (1 t)	-	PA (PF)	DSF	-	0,1
- Déchets métalliques (12,5 t)	-	PA (PF)	TFA	TFA	24
- Boues séchées (1,08 t)	< 2 GBq	PA (PF)	TFA	TFA	1,1
- Amiante (12,98 t)	-	PA (PF)	DSF	-	130
- Filtres d'eau (0,006 t)	-	PA (PF)	F3-01	FMA-VC	< 0,1
- Filtres de ventilation (0,425 t)	-	PA (PF)	TFA	TFA	0,7
- Huile (0,81 t)	-	PA (PF)	DSF	-	0,1
b) Déchets conditionnés					
- Gravats (54 big-bags)	< 0,01 GBq	PA (PF)	TFA	TFA	54
- Plastiques, caoutchouc (36 big-bags)	-	PA (PF)	TFA	TFA	36
- Déchets ferreux (34 caissons 2,66 m <sup>3</sup> )	< 0,1 MBq	PA (PF)	TFA	TFA	90,4
- Déchets non ferreux (5 caissons 2,66 m <sup>3</sup> )	< 0,01 GBq	PA (PF)	TFA	TFA	13,3
- Plastiques, caoutchouc (23 fûts métalliques de 200 litres)	< 0,1 GBq	PA (PF)	TFA	TFA	4,6
- Pulvérulents (15 fûts métalliques de 200 litres)	< 1 GBq	PA (PF)	TFA	TFA	3
- Déchets ferreux (16 caissons métalliques 5m <sup>3</sup> )	< 4 GBq	PA (PF)	F3-2-15	FMA-VC	65
- Plastiques, caoutchouc (61 fûts plastiques de 200 litres)	< 1 GBq	PA (PF)	F3-7-01	FMA-VC	< 0,1
REGIME ADMINISTRATIF : INB 163 - Décret de mise à l'arrêt définitif et de démantèlement complet.					
MESURE DE SURVEILLANCE : En France, l'exploitant d'une INB, d'une INBS ou d'une ICPE est tenu de réaliser la surveillance constante du fonctionnement de ses installations et rejets, sous le contrôle de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN), de l'Autorité de sûreté nucléaire de défense (ANS) ou de la DREAL (ICPE).					

# Entreposage transitoire sur site

Les **entrepôts** de colis sur site permettent la compatibilité dans les temps des diverses opérations, tant pour le démantèlement d'un site que pour des ensembles de sites

Attendre un **refroidissement suffisant** des colis pour qu'ils soient transportables

$< 1000 \text{ W/colis}$



Brennilis : entreposage de déchets sous hangar



$^{60}\text{Co}$  est le corps leader pour la durée de l'entreposage  
demie vie : 5,27 ans, ( désintègre en  $^{60}\text{Ni}$  ,  $Q= 2,823 \text{ MeV}$ ,  
transitions  $\beta^-03$  à 317KeV et  $\gamma\text{-E2}$  à 1332KeV

→ La disponibilité des **infrastructures d'entreposage** conditionne le démarrage des travaux de démantèlement

# Conteneurs et capsulation

En très grand nombre :

→ des milliers à des centaines de milliers

Aller vers un nombre de catégories à géométrie extérieure aussi réduit que possible

→ cf. *containers* des transports maritimes

Fût métallique de déchets cimentés, Andra



Colis béton fibres, Andra

Les normes doivent être **compatibles entre fabricants et exploitants**, non seulement dans un pays, mais aussi aux **échelles européennes et mondiales**

# Évacuations des débris radioactifs hors du site

---

Le besoin : entreposer pendant quelques années

~**100 000 tonnes par réacteur** de déchets représentant  $10^{18}$  Bq

## Rappel de la réglementation:

« Les déchets issus des **zones** à déchets nucléaires sont tous considérés comme radioactifs, même si aucune radioactivité n'y est détectée. »

Paramètres conditionnant la durée de l'entreposage sur site :

- l'existence d'un exutoire régional ou national
- la possibilité de transporter les déchets
- l'existence d'un entreposage définitif

→ l'entreposage local doit pouvoir être adapté aux différentes situations

Options pour les exutoires régionaux ou nationaux :

- Souterrain
- En surface
- En sub-surface

Questions à prendre en compte pour ces exutoires :

- Durée d'entreposage
- Sûreté

---

1. Enjeux du démantèlement

2. Inventaires des RN et déchets

3. Techniques de démantèlement

4. Gestion des déchets

**5. Organisation du chantier**

- i. Paramètres d'ajustement du processus de démantèlement
- ii. Pratiques et règlements internationaux
- iii. *Exemption and clearance*
- iv. Radioprotection

6. Conclusion

# Paramètres d'ajustement du processus de démantèlement

---

Paramètres extérieurs au chantier :

1. **Conception** du réacteur (choix des matériaux)
2. **Exploitation** du réacteur (taux de burn-up)
3. Aval de l'exploitation : **existence d'exutoires** pour les déchets

Paramètres intérieurs au chantier :

- **Quand est-ce que l'on commence** le démantèlement ?  
question du délai entre l'arrêt du réacteur et le début de son démantèlement
- **Jusqu'où l'on va** dans l'assainissement du site ?  
retour "à l'herbe" ?

Trois considérations incontournables :

- ce qu'il faut **traiter immédiatement**  
retirer les éléments combustible, sous peine de poursuivre l'activation des structures
- ce sur quoi l'on peut **agir rapidement** : les éléments démontables  
couvercle, échangeurs de chaleur, pompes, vannes, ...
- **ce qui ne dépend pas de notre intervention** : les structures fixes  
conditionné par la période de décroissance des noyaux radioactifs  
(noyaux leaders :  $^{60}\text{Co}$  : 5,3 ans,  $^{55}\text{Fe}$  : 2,7 ans,  $^{63}\text{Ni}$  : 100 ans)

# Pratiques et règlements internationaux

Règlements internationaux (UE, NEA/OCDE, AIEA, etc.) :

- Safety standards
- Waste disposal
- Cost control and financing
- Responsibility transfer
- Site agreement
- Exemption and clearance levels

- ...

**AIEA** : trois options de démantèlement :

1. **Démolition commençant immédiatement** (*immediate dismantling*)
2. **Clôture** (*Safe Enclosure* ou *SAFESTOR*)
3. **Stockage d'attente** (*Entombment*)

Le plus fréquent



# Exemption and clearance

## IAEA -Application of the Concepts of Exclusion, Exemption and Clearance - RS-G-1.7

“the effective dose expected to be incurred by any member of the public due to the exempted practice or source is of the order of **10  $\mu$ Sv** or less in a year”

(Repris dans la Directive 2013/59/Euratom, 5 décembre 2013)

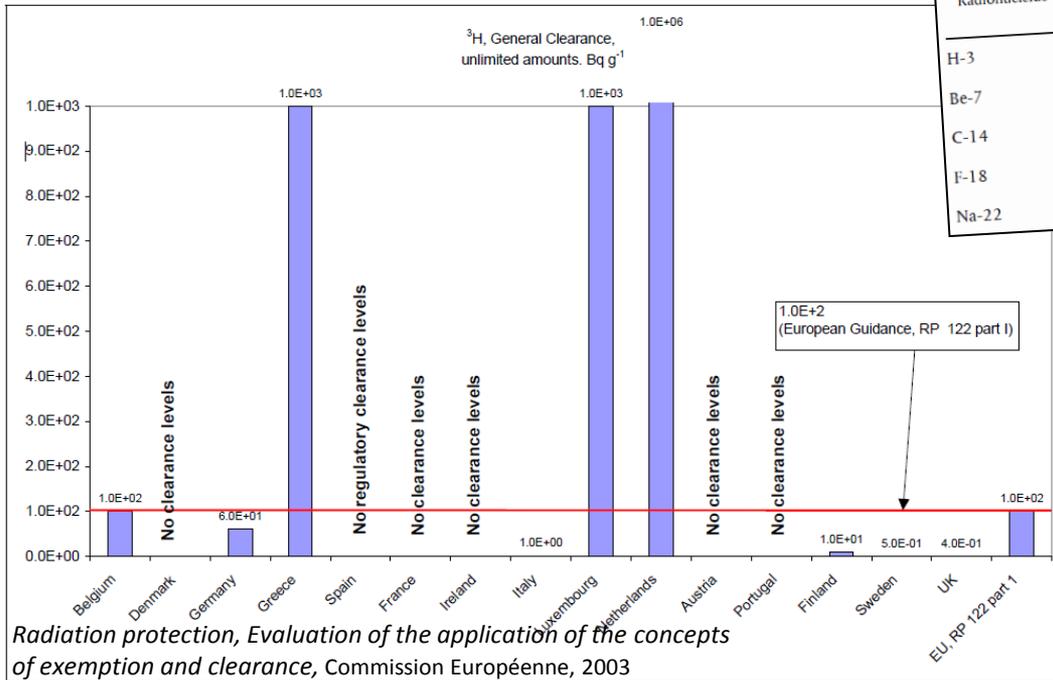


TABLEAU A - PARTIE 1

Radionucléides artificiels

Radionucléide	Concentration d'activité (kBq kg <sup>-1</sup> )	Radionucléide	Concentration d'activité (kBq kg <sup>-1</sup> )
H-3	100	K-43	10
Be-7	10	Ca-45	100
C-14	1	Ca-47	10
F-18	10	Sc-46	0,1
Na-22	0,1	Sc-47	100

Radionucléide	Concentration d'activité (kBq kg <sup>-1</sup> )
Mn-56	10
Fe-52 (β)	10
Fe-55	1 000
Fe-59	1
Co-55	10

« Les États membres n'autorisent pas la dilution délibérée de matières radioactives destinée à faire en sorte que ces matières soient exemptées du contrôle réglementaire »

The French system does not involve any site or waste liberation; products and sites stay within the “nuclear industry”.

NEA/RWM/RF(2004)6

# Radioprotection

---

Critères de radioprotection :

- i. pour les **travailleurs sur le site du démantèlement**,
- ii. pour **qu'après le démantèlement**, toute personnes, travaillant, ou habitant, ou utilisant le site décontaminé ne soit exposé à aucun danger,
- iii. normes d'expositions aux radiations des travailleurs sur le site, du public et consignes pour toutes les personnes présentes et futures sur le site et au voisinage

Le dilemme :

démantèlement immédiat : met en avant la **sécurité du citoyen (?)**

démantèlement différé : **minimise le taux d'exposition** des operateurs

NRC (États-Unis) :

“The Commission has established a dose of [...] **0.25 mSv** per year total effective dose equivalent to an average member of the critical group [ie. La population la plus exposée] as an acceptable criterion for release of any site for unrestricted use”

[NRC FAQ](#), 12/2013

# Conclusion

---

1. Le besoin : traiter les conséquences des 2% de neutrons fuyant le cœur
2. Développer des méthodes génériques  
Profiter du retour d'expérience sur les démantèlements spécifiques actuels  
Influer sur la conception des futures générations de réacteurs
3. Les variables d'ajustement  
quand-est-ce qu'on commence (attente après fin d'exploitation) ?  
jusqu'où va-t-on dans l'assainissement ?
4. Mettre en place un tri sélectif au niveau radiologique

**Se méfier des fausses bonnes idées**

ex : commencer le plus vite possible, concevoir pour démanteler...

**Traiter le démantèlement à l'échelle industrielle**  
au-delà du sur-mesure actuel