

cea

energie atomique • energies alternatives



EFMMIN 2011
Marseille - France
16-20 mai 2011



La mesure et l'instrumentation nucléaire dans le cycle du combustible nucléaire

Loïck Martin-Deidier

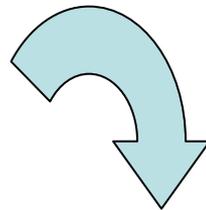
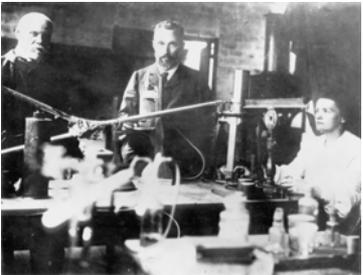
Directeur Adjoint de l'Energie Nucléaire

Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives



Genèse de la mesure nucléaire...

A la fin des années 1960, l'énergie nucléaire aborde une ère d'industrialisation rapide renforcée par la hausse brutale du prix du pétrole à la suite de la crise de 1973.



Le contrôle, la surveillance et le suivi aussi bien des matières radioactives que du bon fonctionnement des installations nucléaires se sont avérés essentiels et primordiaux pour les principales nations concernées.



La mesure nucléaire...

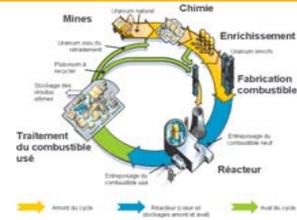


Les techniques de mesure, de contrôle et de caractérisation ont connu leur première réelle impulsion



Constamment améliorées, optimisées et adaptées pour les besoins de *l'ensemble du cycle du combustible*.

Le cycle du combustible nucléaire...



Il s'agit de l'ensemble des opérations contribuant à la production du combustible et à sa gestion une fois qu'il est irradié, sorti du réacteur puis traité ou entreposé ainsi que celles liées au démantèlement et à la gestion des déchets.

Amont

- ✓ Extraction
- ✓ Conversion
- ✓ Enrichissement
- ✓ Fabrication



Réacteur

- ✓ Combustion



Aval

- ✓ Traitement combustible usé
- ✓ Démantèlement
- ✓ Gestion Déchets



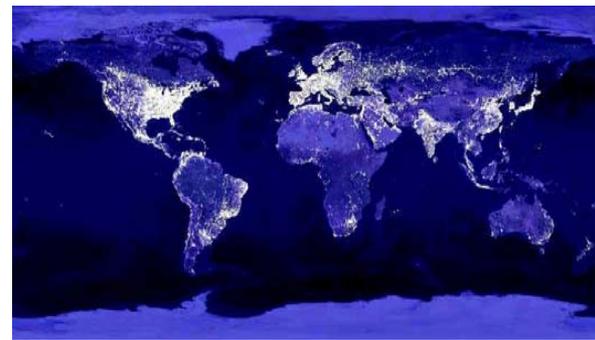
Les besoins en énergie dans le monde

LE CONTEXTE ACTUEL

Au début des années 1970



Actuellement (2010)





Les besoins énergétiques mondiaux

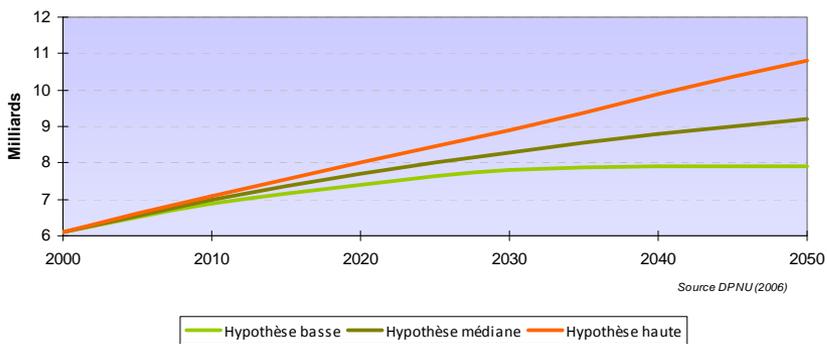
Une croissance de la population mondiale de 6 milliards aujourd'hui à 10 milliards en 2050



Une demande en énergie qui va croître fortement

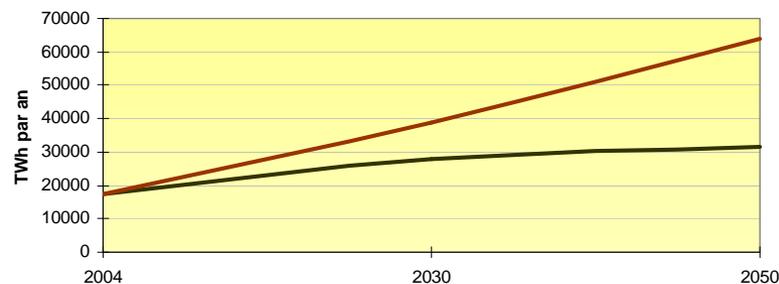


Prévisions des Nations Unies pour la population mondiale



Source : Perspectives de l'énergie nucléaire – 2008 (Agence de l'Énergie Nucléaire – AEN)

Projection de la demande en énergie primaire



Et près de 2 milliards d'êtres humains qui n'ont toujours pas accès aux formes modernes d'énergie ...

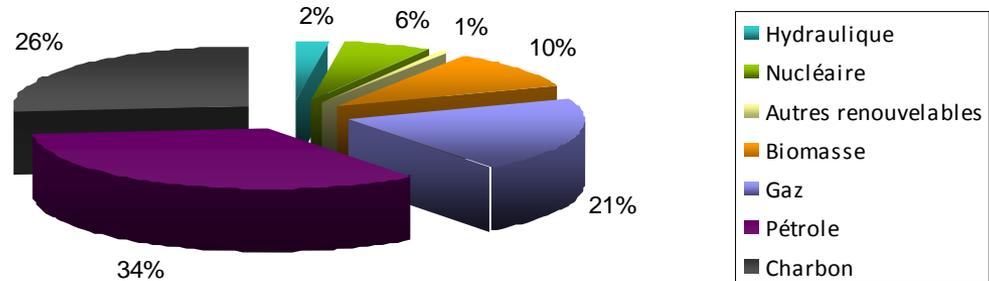
Les différentes sources d'énergie dans le monde



energie atomique • energies alternatives

Un mix énergétique mondial qui montre une forte domination des combustibles fossiles

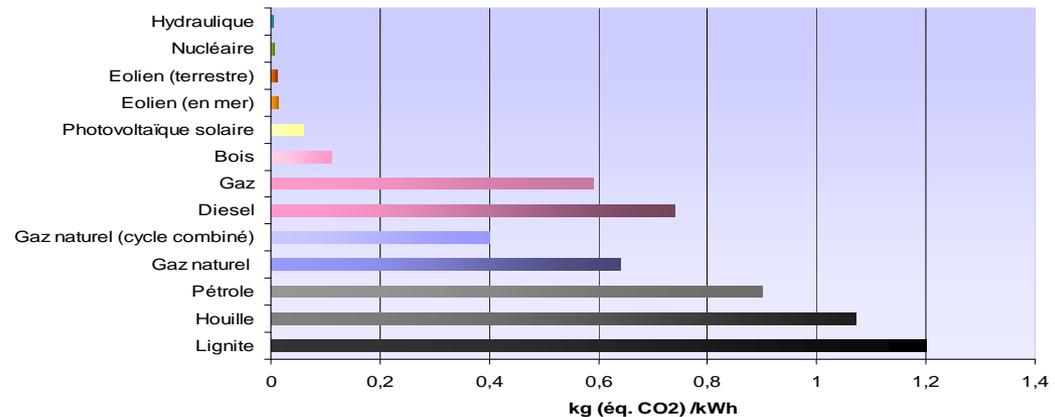
Energie primaire mondiale : 11,7 Gtep



Source : Agence Internationale de l'Energie (AIE) - 2006

Une production énergétique fortement émettrice de gaz à effet de serre

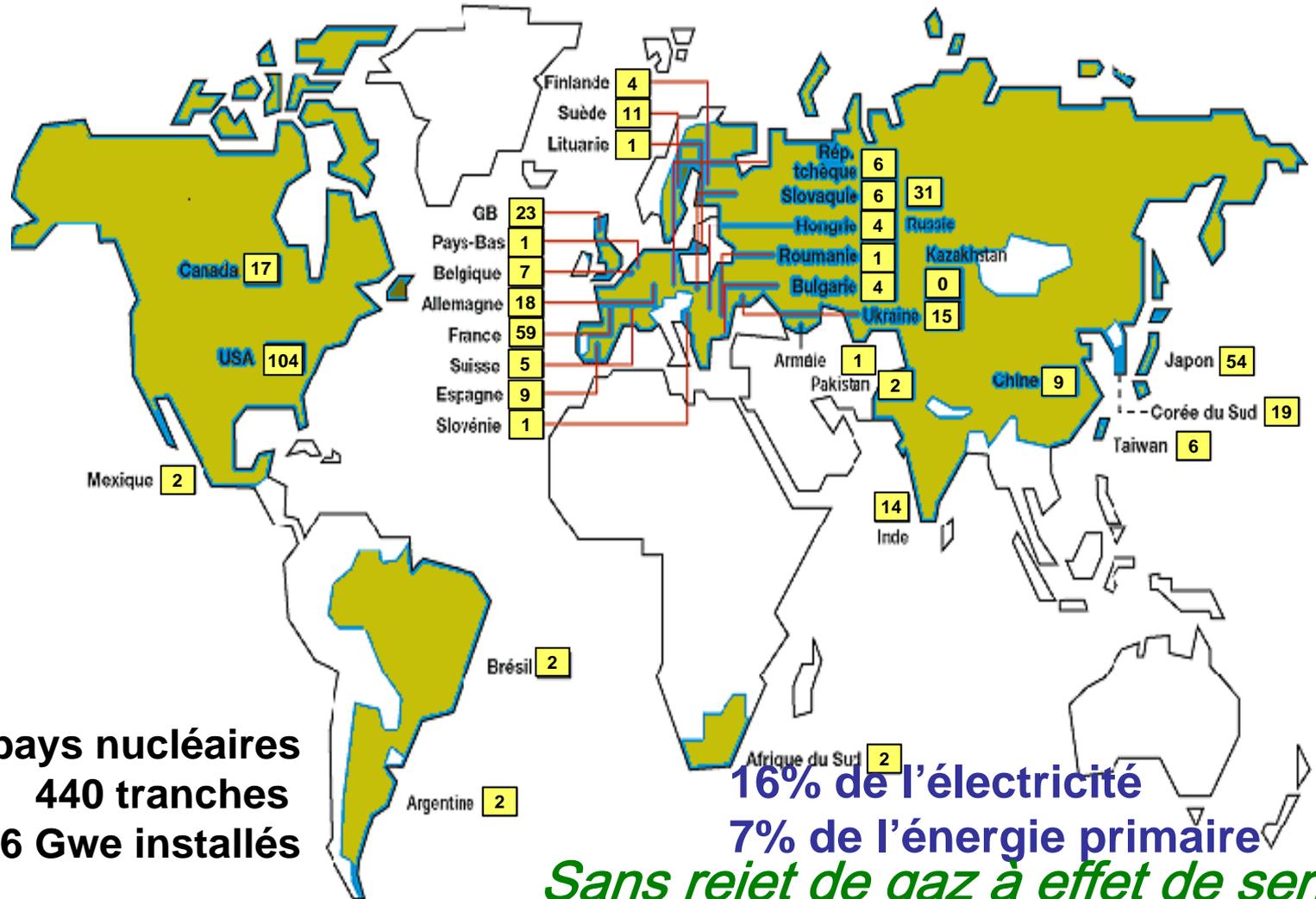
Emissions de gaz à effet de serre de certaines filières énergétiques



La place actuelle du nucléaire dans le monde



energie atomique • energies alternatives



**Plus de 30 pays nucléaires
440 tranches
366 Gwe installés**

**16% de l'électricité
7% de l'énergie primaire**
Sans rejet de gaz à effet de serre

L'énergie nucléaire ...

ATOUTS :

- densité énergétique
- pas de CO₂
- coût stable
- ressources : millénaires avec concepts

MAIS des risques spécifiques à maîtriser :

- sûreté des réacteurs
- risque de prolifération
- les déchets nucléaires



Le suivi, le contrôle et la caractérisation sont capitaux



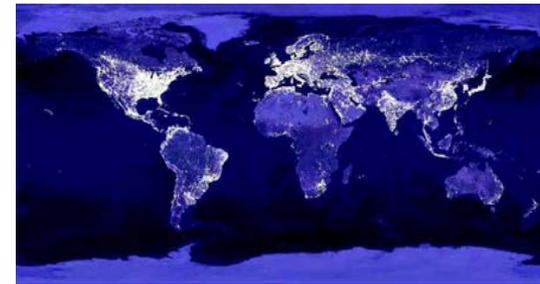
L'énergie nucléaire ...

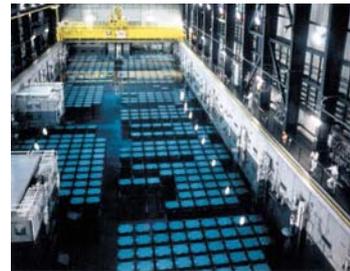
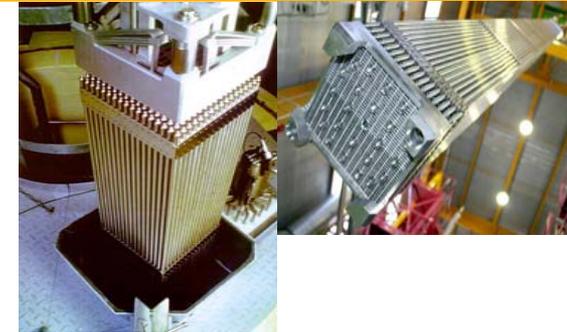
Malgré l'accident de Fukushima

Elle conserve tous ses atouts et reste la seule solution permettant de répondre aux besoins énergétiques mondiaux sans faire augmenter drastiquement la production de gaz à effet de serre.

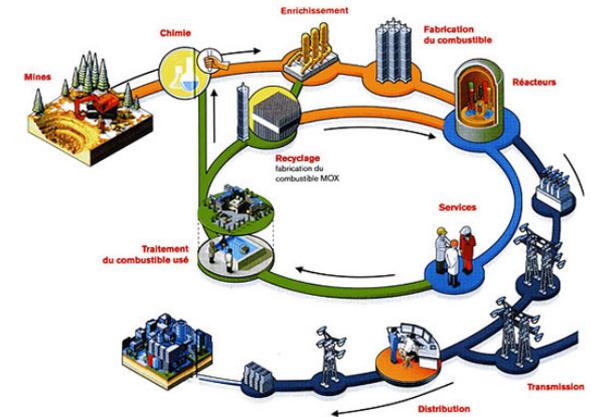


Le retour d'expérience de Fukushima imposera des installations encore plus sûres et ralentira le calendrier dans certains pays mais ne remettra pas en cause la nécessité du nucléaire.





Le cycle du combustible nucléaire



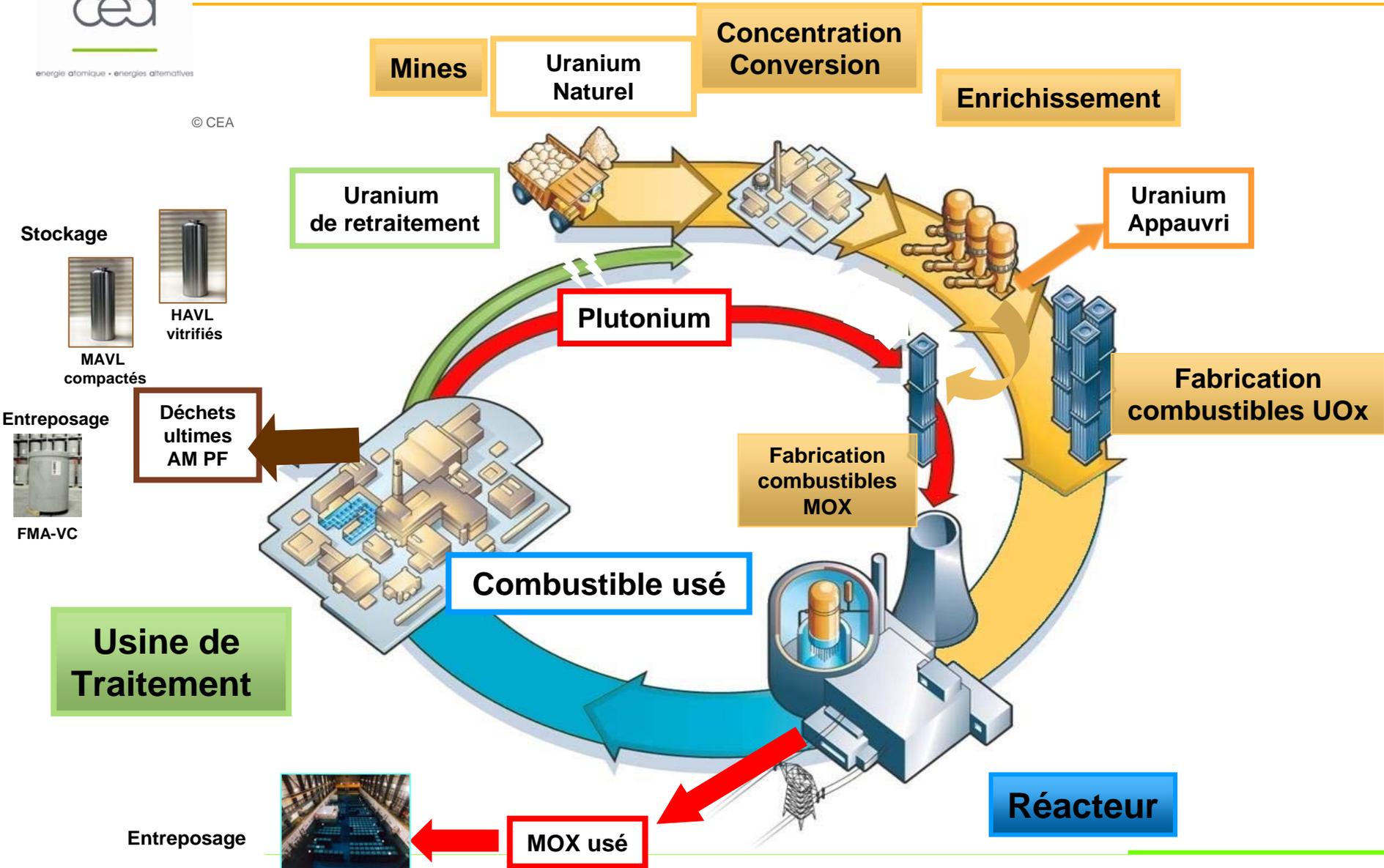
Document AREVA. www.areva.com

Le cycle du combustible du nucléaire

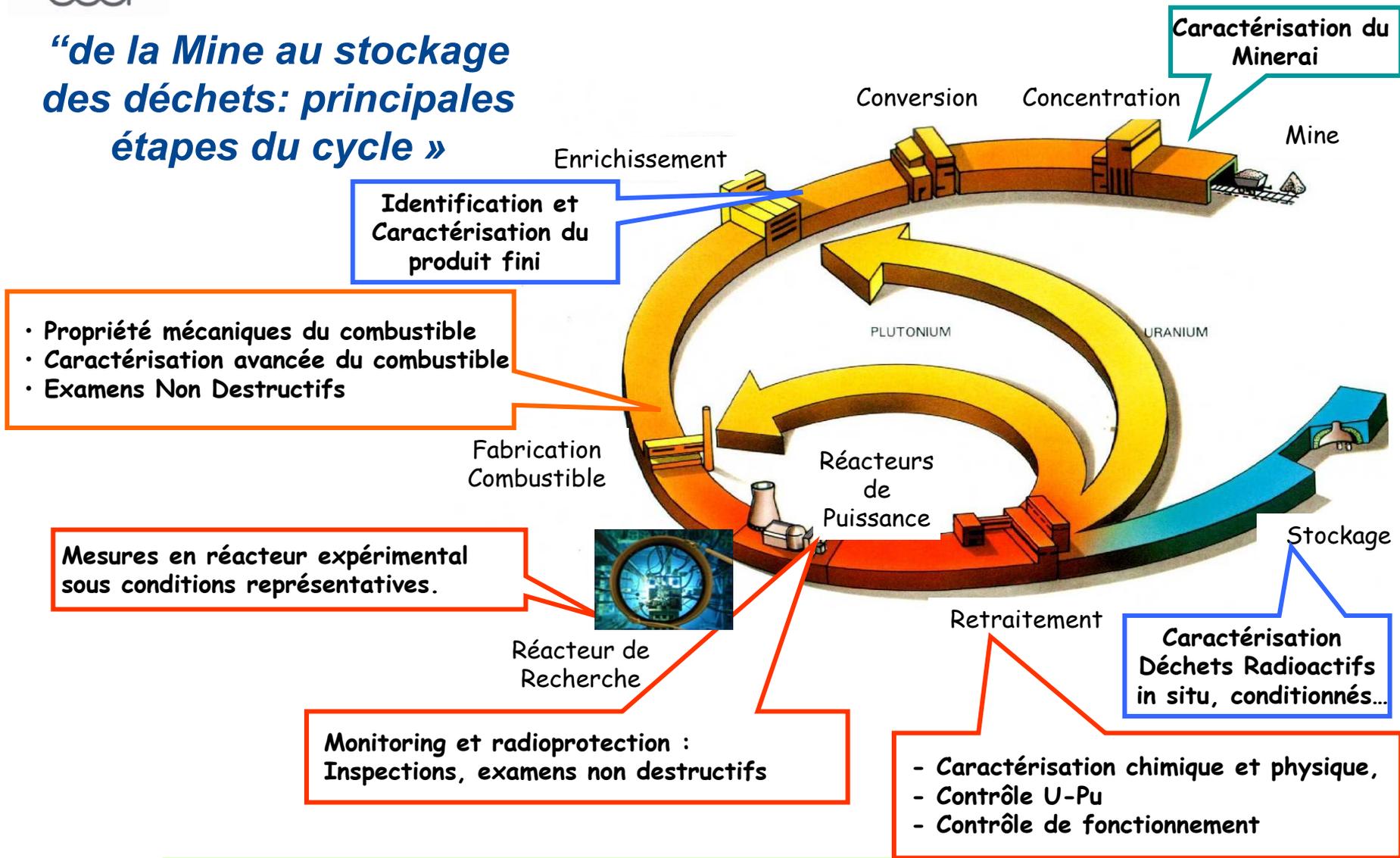


energie atomique • énergies alternatives

© CEA



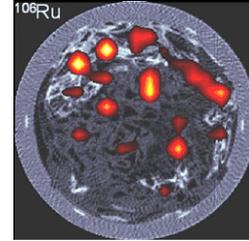
«de la Mine au stockage des déchets: principales étapes du cycle »



De la mesure nucléaire pour ...

❖ *Caractérisation radiologique :*

- **d'installation,**
- **de colis de déchets**
- **d'équipements chaudronnés, tuyauteries...**



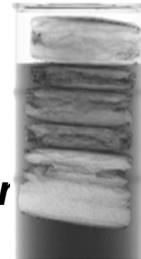
❖ *Caractérisation physique :*

- **transmission photonique**
- **imagerie active : radiographie , tomographie**



❖ *Caractérisation élémentaire :*

- **interrogation / activation neutronique : caractérisation d'éléments toxiques chimique, détection de matières illicites**

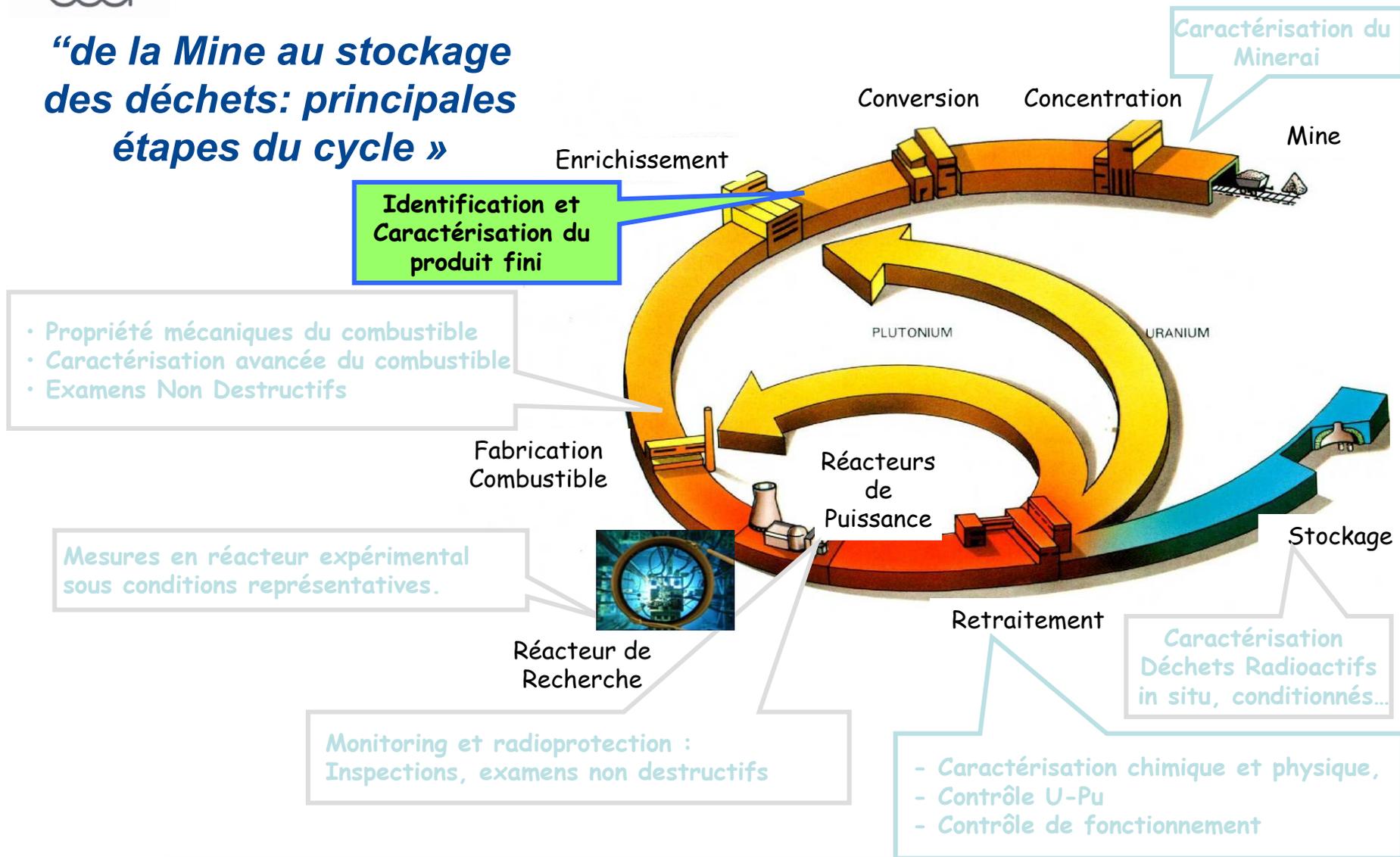


❖ *Contrôle de procédé d'installations nucléaires :*

- **fonctionnement,**
- **criticité,**
- **performances**

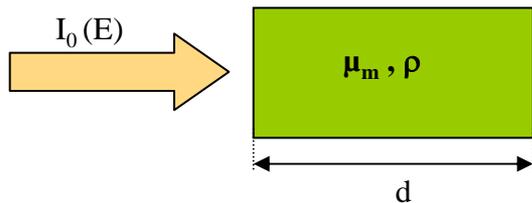


«de la Mine au stockage des déchets: principales étapes du cycle »



Mesure précise (1‰) de la masse volumique de pastilles MOX à leur fabrication

Transmission γ en ligne droite couplée à micrométrie

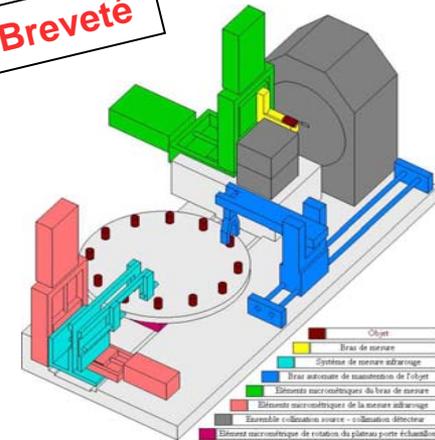


$$\frac{\sigma\rho}{\rho} = f\left(\frac{\sigma I_0}{I_0}, \frac{\sigma I}{I}, \frac{\sigma\mu_m}{\mu_m}, \frac{\sigma d}{d}\right)$$

$$I(E) = I_0(E) \exp(-\mu_m \rho d)$$

ADAMS
Active Density Analysis and Measurement System

Breveté

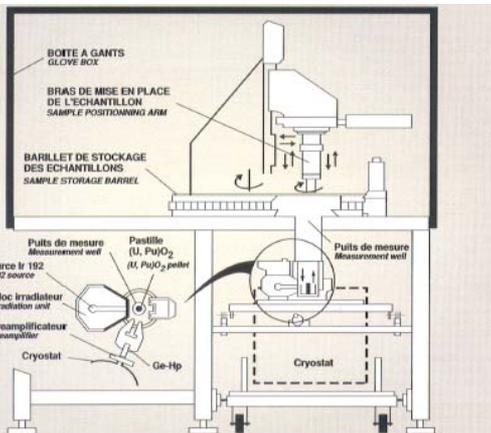
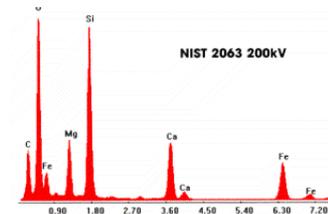


Détermination du ratio Pu/U par γ fluorescence X (PANDA)

- Méthode de caractérisation élémentaire
- Excitation par source de ^{137}Cs (500 GBq)
- Détection des raies X K par spectro γ
- Mesure ^{241}Am et Cl [Pu] par spectro γ passive

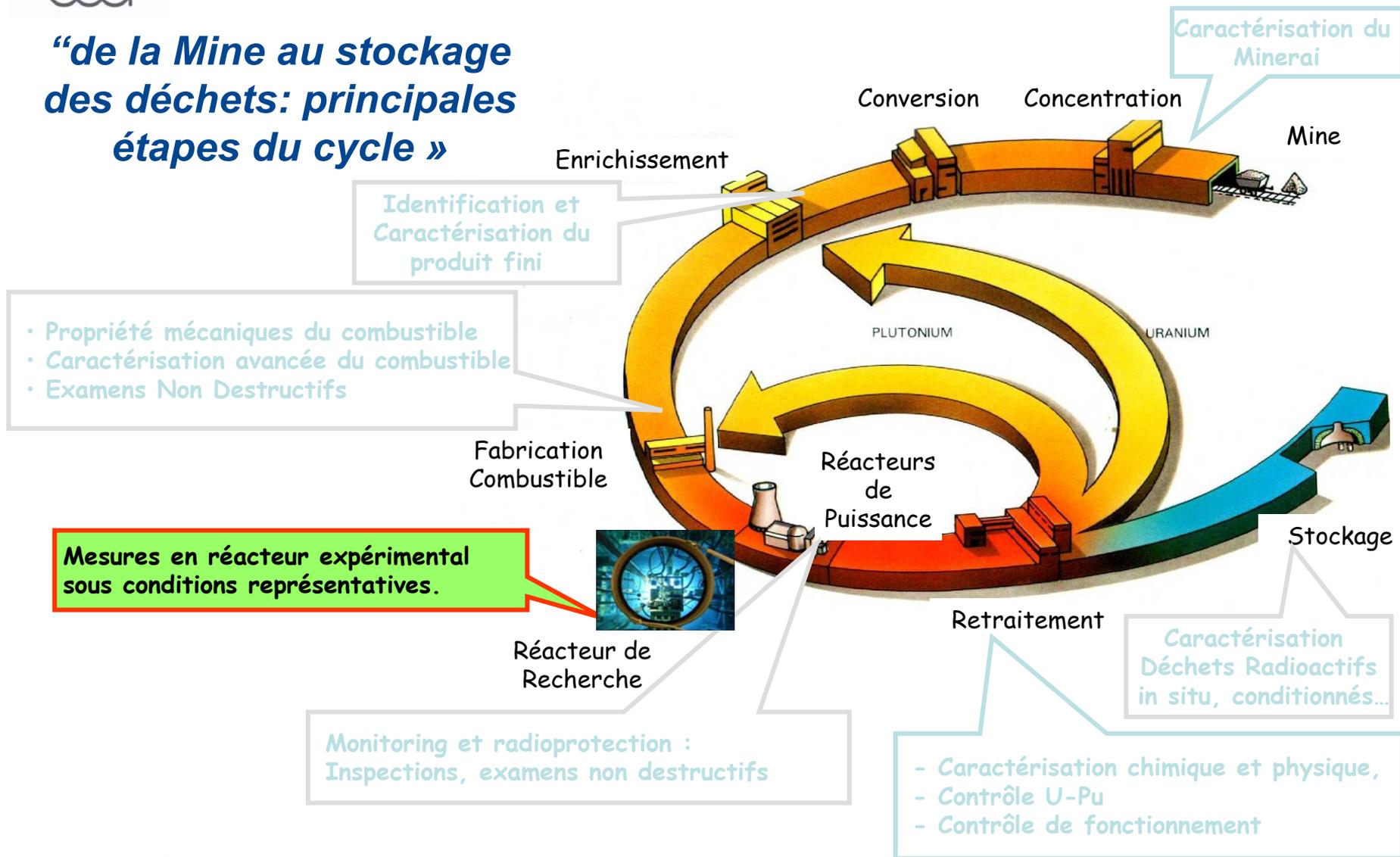
Ecart-type relatif $\approx 0,2\%$ pour Pu et $2,5\%$ pour Am en 20 min de mesure

Ecart-type relatif (1σ) (durée mesure : 10 à 20 minutes selon l'enrichissement)			
RNR		PWR	
14 % < Pu < 18 %		2,8 % < Pu < 7,7 %	
Pour Pu	Pour Am	Pour Pu	Pour Am
0,20 %	2,40 %	0,22 %	2,60 %





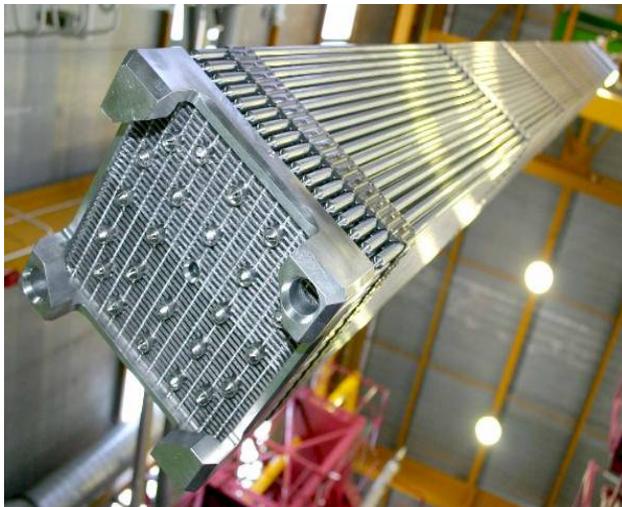
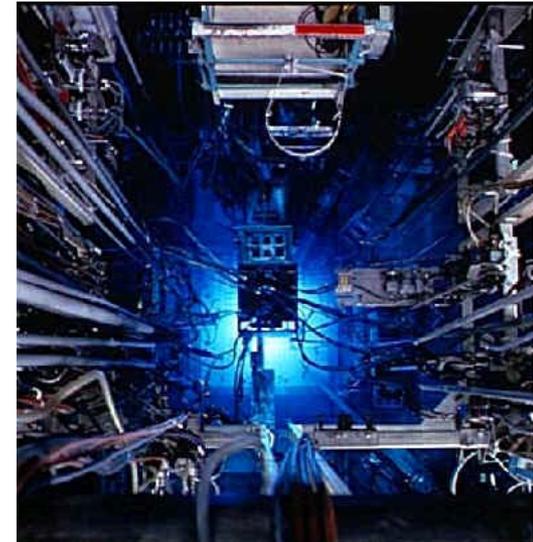
«de la Mine au stockage des déchets: principales étapes du cycle »



Corrosion sous contrainte
de la gaine par l'iode de fission



Qualification de nouveaux combustibles
par des rampes de puissance (réacteur
OSIRIS du CEA)



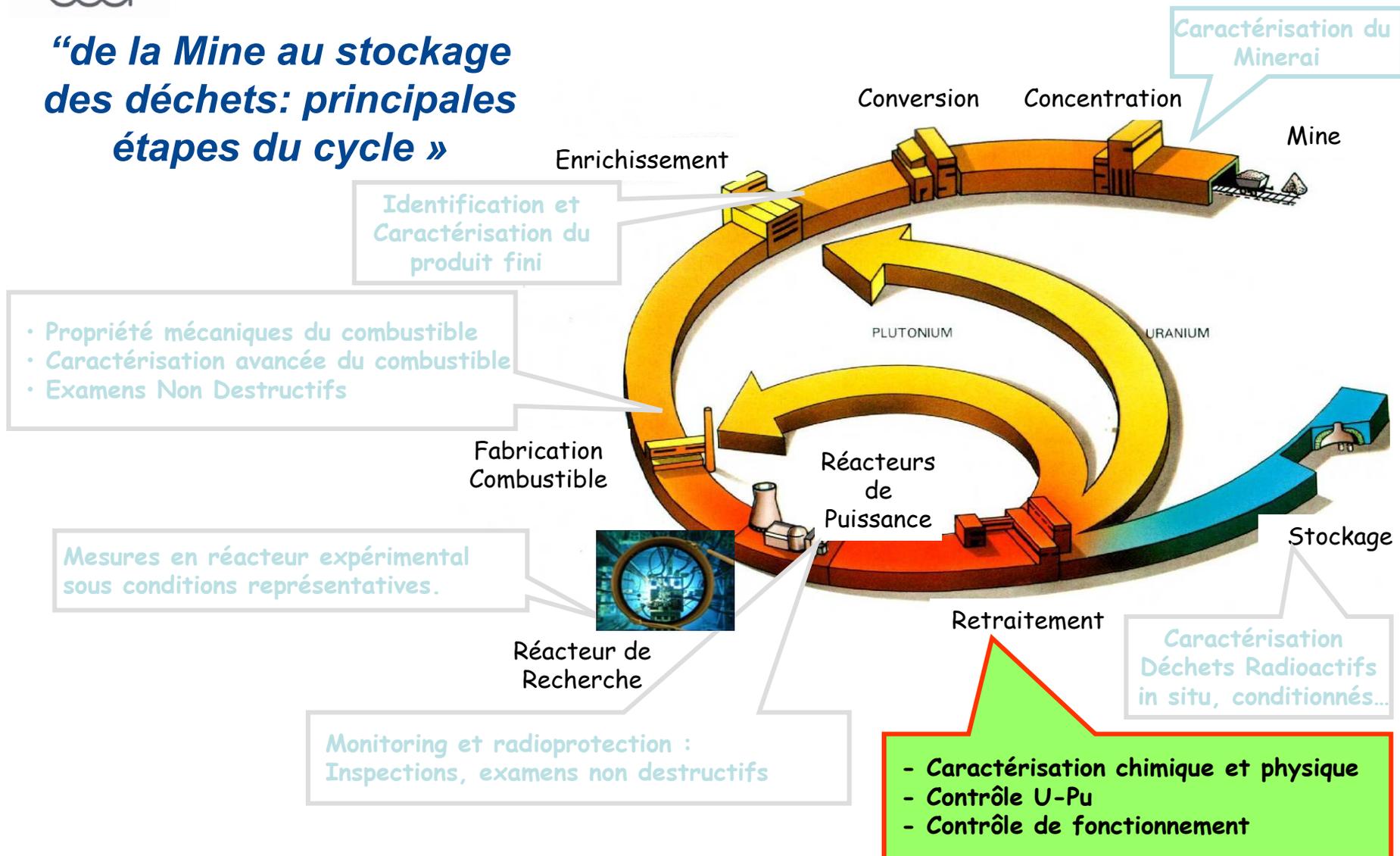
Augmentation de l'usure due aux
vitesses d'écoulement
du fluide et aux vibrations induites



Nouveaux designs, nouveaux matériaux...



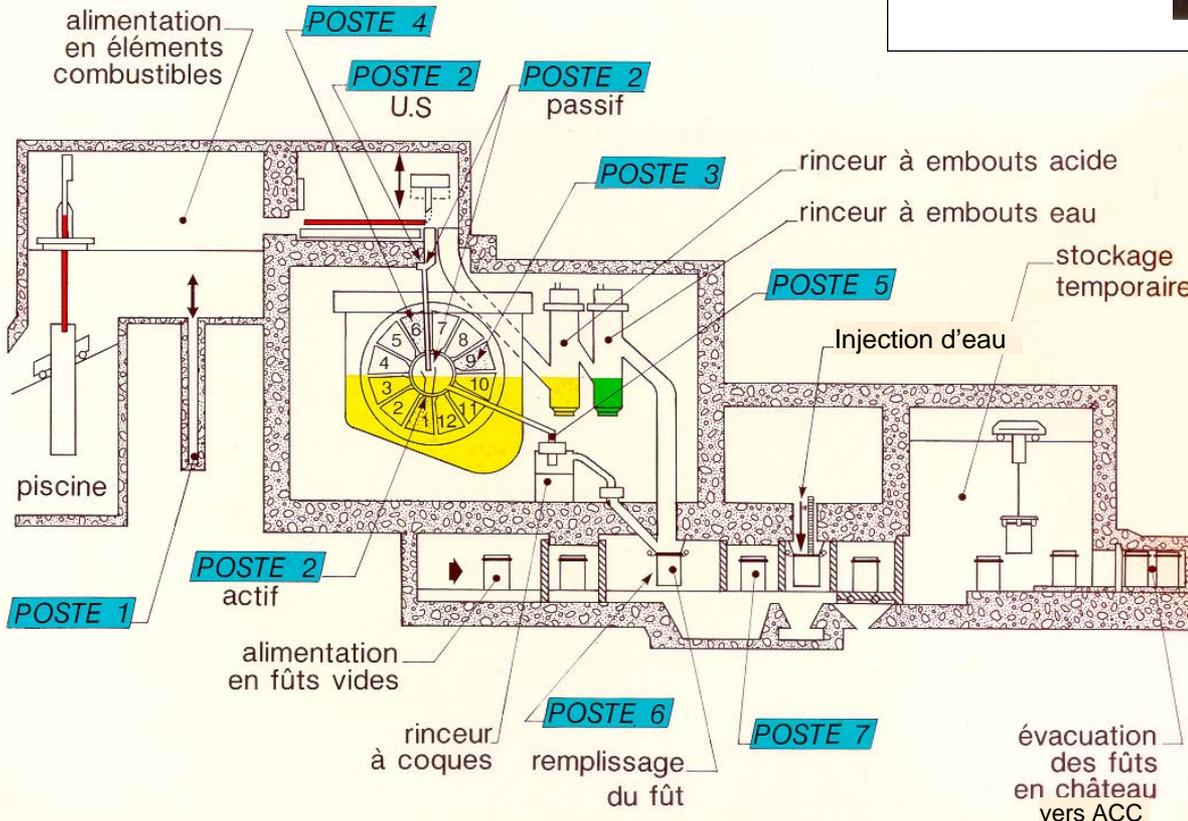
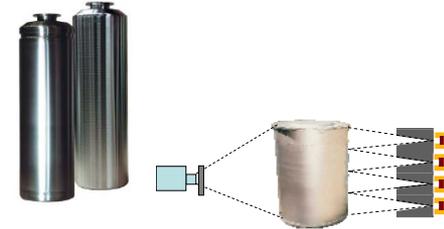
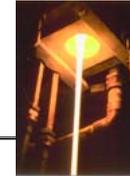
“de la Mine au stockage des déchets: principales étapes du cycle »



Usines de retraitement de combustible nucléaire usé (AREVA La Hague, Rokkasho Mura)

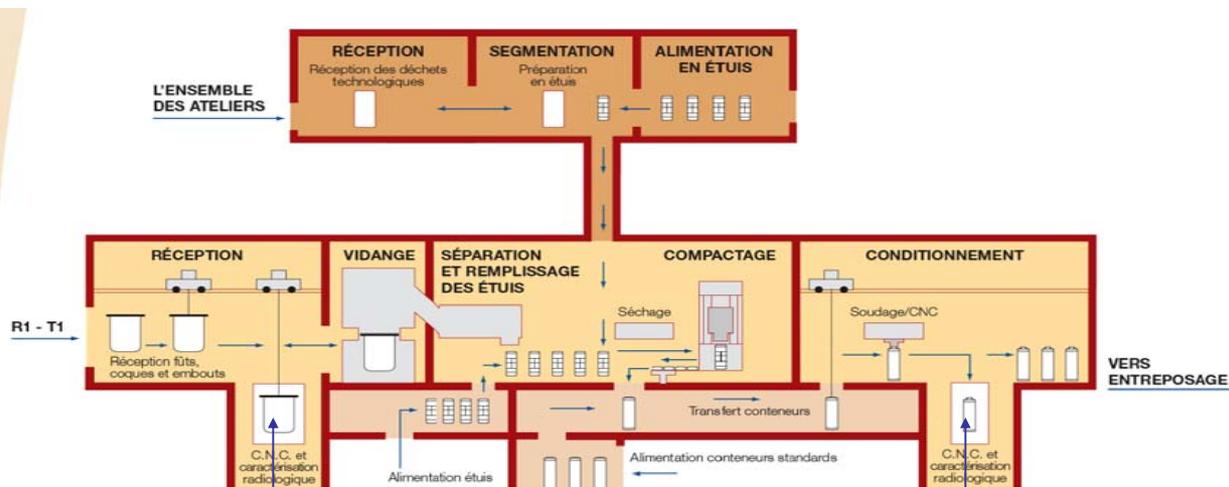


Atelier de cisailage – dissolution



1. *Mesure du taux de combustion*
2. *Contrôle de non engorgement trémies / goulotte du dissolvant*
3. *Contrôle de dissolution*
4. *Contrôle de vidange*
5. *Non engorgement du rinçage des coques*
6. *Contrôle de remplissage des fûts de coques et embouts*
7. *Détermination de la quantité de matière fissile résiduelle dans les fûts et vérification des paramètres garantis*
8. *Mesures fond de cuve (non représentées ici)*

Atelier de Compactage des Coques et embouts (ACC)



Poste 0

Spectrométrie γ +
mesure neutronique
passive/active

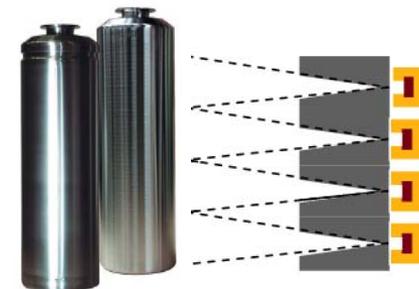
Poste 2

- **Objectifs**

- ✓ Quantifier les émetteurs γ mesurables (^{137}Cs , ^{60}Co , ^{154}Eu , ^{134}Cs ...)
- ✓ Evaluer les taux de combustion ($^{154}\text{Eu}/^{137}\text{Cs}$) et temps de refroidissement ($^{154}\text{Eu}/^{134}\text{Cs}$)
- ✓ Evaluer les ratio $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ et $^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ (via $^{154}\text{Eu}/^{137}\text{Cs}$)

- **Poste de mesure**

- ✓ 5 détecteurs Ge-HP (semi plan)
- ✓ Écrans + collimateur à fente mobile visant 1/5 de CSD-C



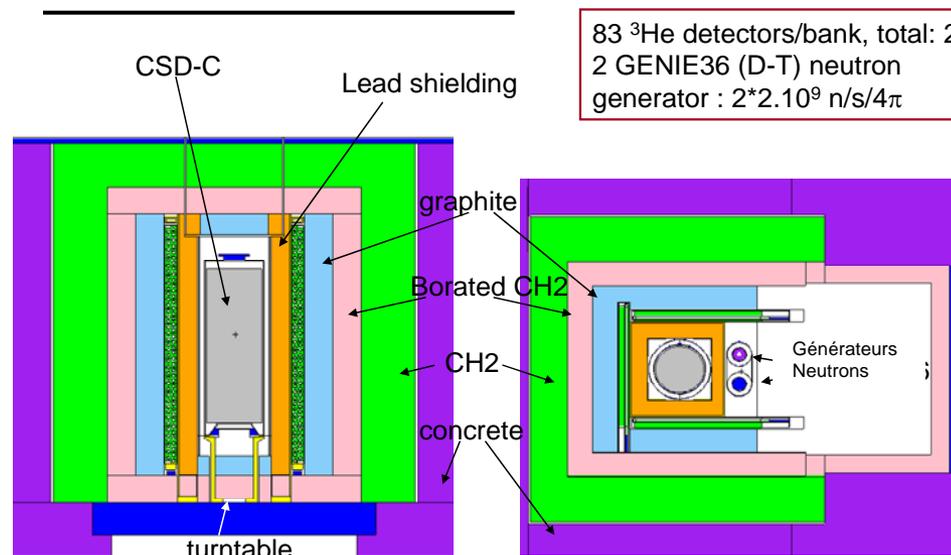
- **Objectifs**

- ✓ **Quantifier la matière fissile résiduelle**

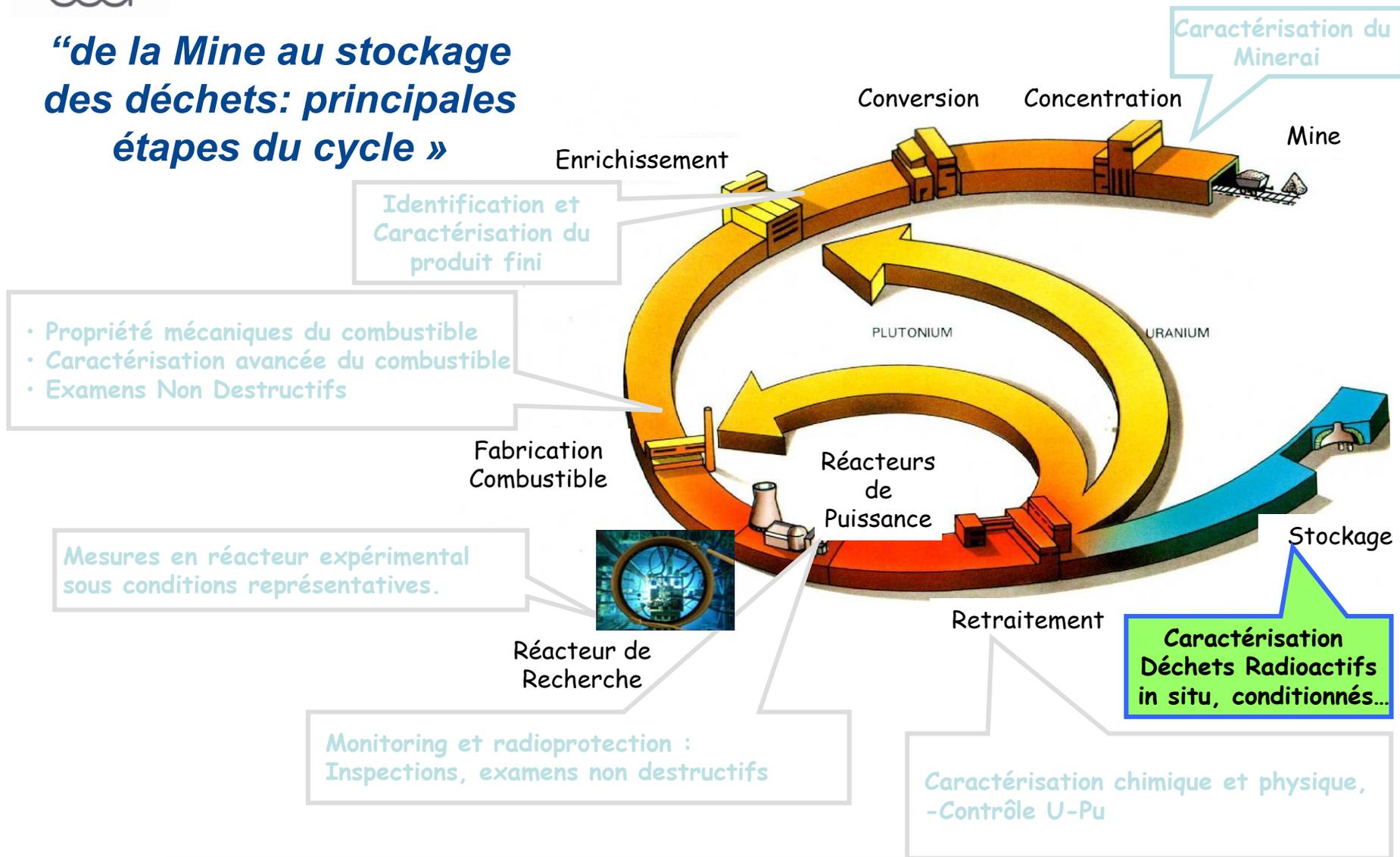
- ✓ Evaluer les quantités de ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu et ^{244}Cm

- **Poste de mesure**

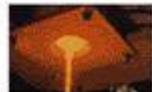
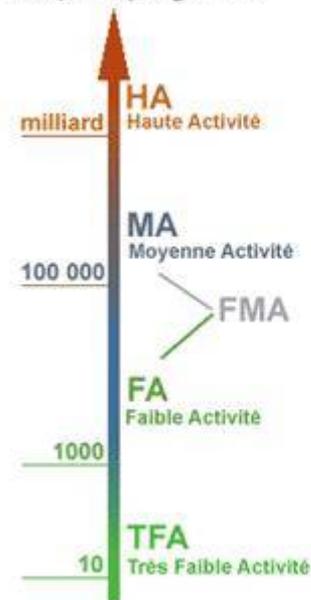
- ✓ 2 générateurs de neutrons ($\Rightarrow 4 \cdot 10^9$ n/s) et 249 détecteurs ^3He
- ✓ Mesure simultanée des neutrons prompts et retardés de fission induite
- ✓ Mesure neutronique passive



«de la Mine au stockage des déchets: principales étapes du cycle »



Becquerel par gramme



Produits de fission vitrifiés



Filtres en fût béton



Gants, blouses

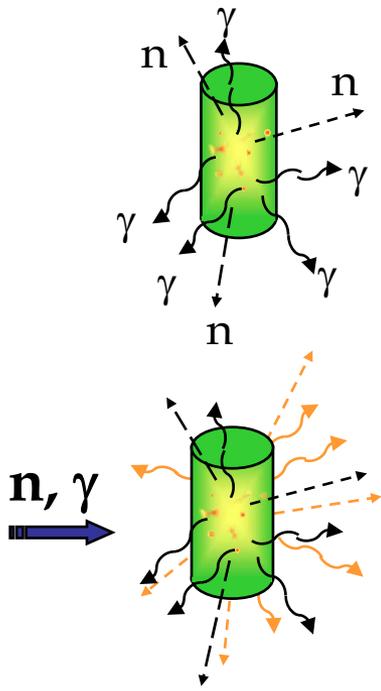


Gravats, ferrailles

	Vie courte période principaux éléments < 30 ans	Vie longue période principaux éléments > 30 ans
Très Faible Activité (TFA) 		A l'étude <i>(résidus miniers)</i>
Faible Activité (FA) 	Stockage en surface (Centre de l'Aube) 	A l'étude : Déchets radifères Déchets graphites
Moyenne Activité (MA) 	A l'étude pour les déchets tritiés	A l'étude
Haute Activité (HA) 	Loi du 30 décembre 1991 puis Loi du 28 juin 2006	

- Objectif \Rightarrow gestion optimale des déchets radioactifs
 - ✓ Contrôle de la qualité des déchets produits
 - ✓ Orientation vers la filière de gestion appropriée
 - ✓ Optimisation des entreposages et stockage

Les mesures nucléaires non destructives (MND)

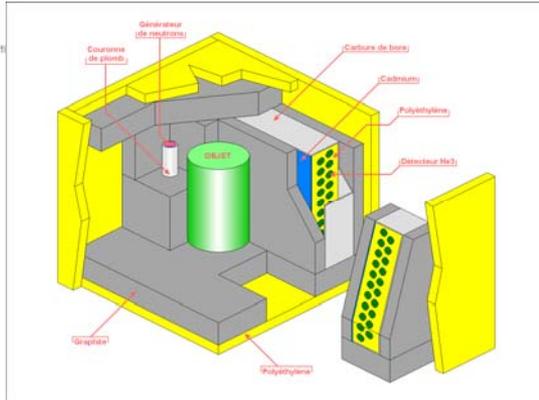


- Les mesures passives
 - photoniques : débit de dose, spectrométrie gamma, tomographie d'émission gamma
 - neutroniques : comptage total, comptage des coïncidences et des multiplicités neutroniques
- Les mesures actives
 - imagerie par transmission photonique ou neutronique
 - interrogation neutronique \Rightarrow neutrons prompts et retardés de fission, rayonnements gamma par réactions $(n, n'\gamma)$, (n, γ) et activation neutronique (n, p) , (n, α) ...
 - interrogation photonique \Rightarrow neutrons et rayonnements gamma retardés de photofission, rayonnements gamma d'activation photonique

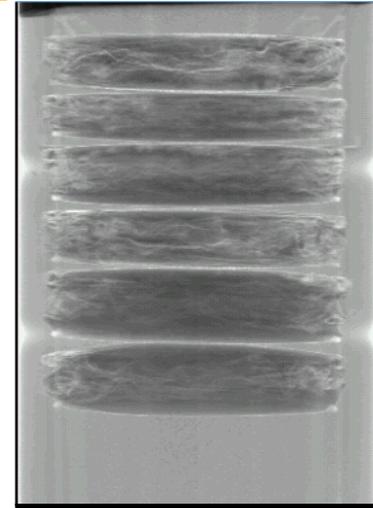
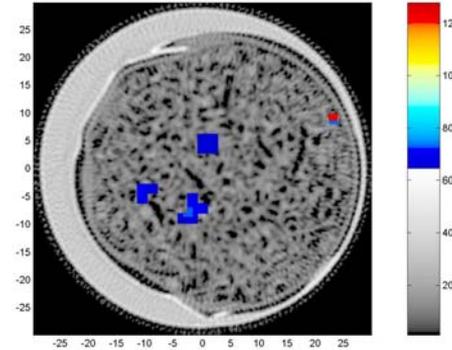
Quelques exemples de méthodes de MND



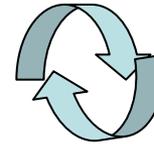
energie atomique • énergies alternat



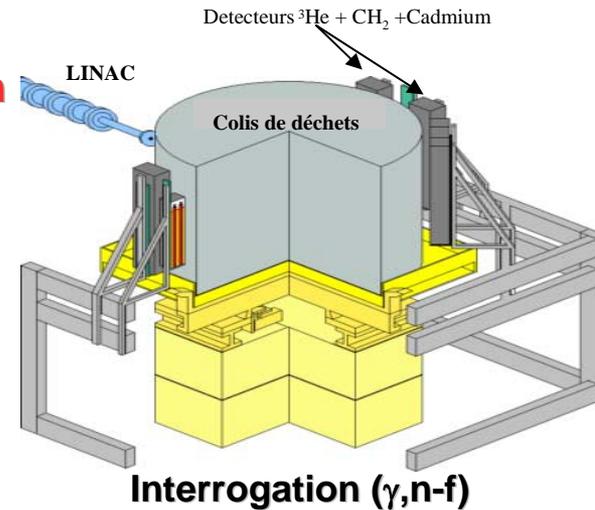
Interrogation (n,f)



Imagerie et tomographie photoniques

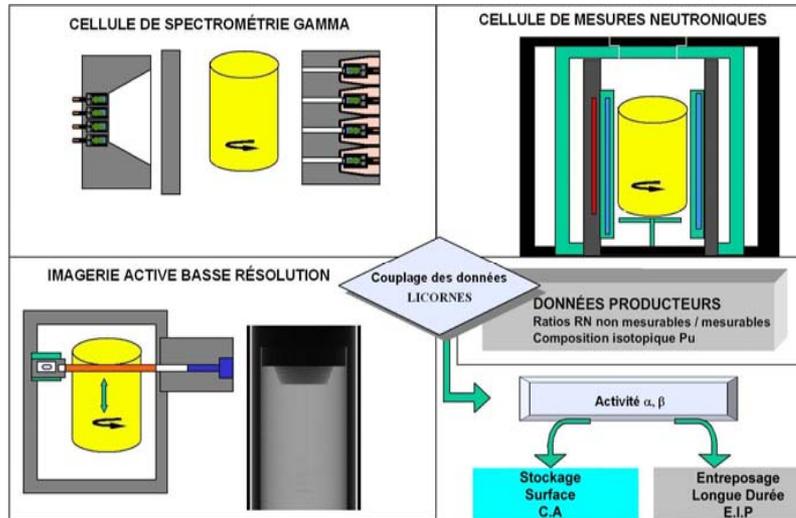


Combinaison



Interrogation (γ,n-f)

Unité
de Tri
de Marcoule



Couplage de méthodes mesures



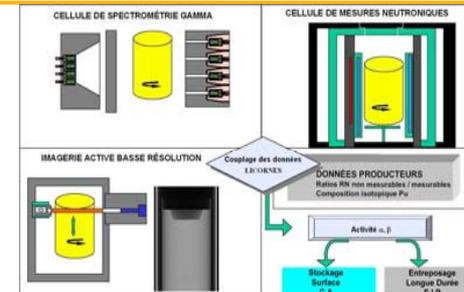
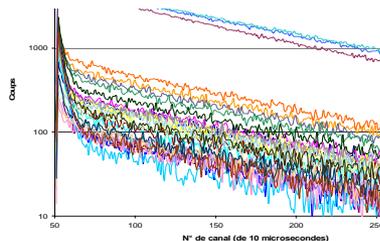
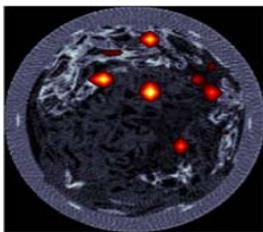
energie atomique • energies alternatives

- Plus de radioéléments mesurables

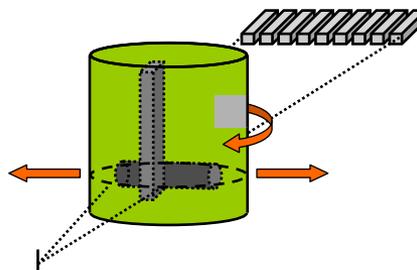
⇒ **Inventaire radiologique plus complet**

- Réduction des incertitudes

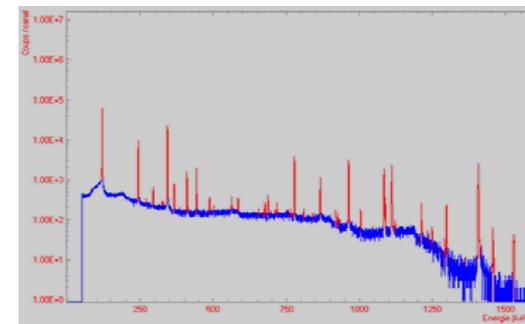
- Résultats obtenus avec différentes méthodes: cohérence croisée
- Complémentarité : composition isotopique du plutonium par spectrométrie gamma ⇒ interprétation des mesures neutroniques
- Caractérisation de matrice : transmission photonique ou neutronique, spectrométrie des rayonnements gamma induits par interrogation neutronique



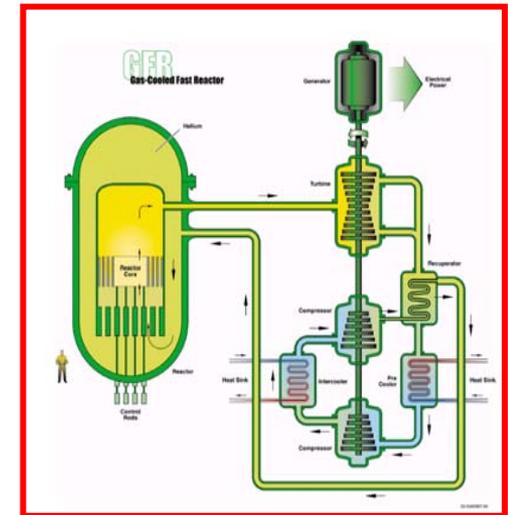
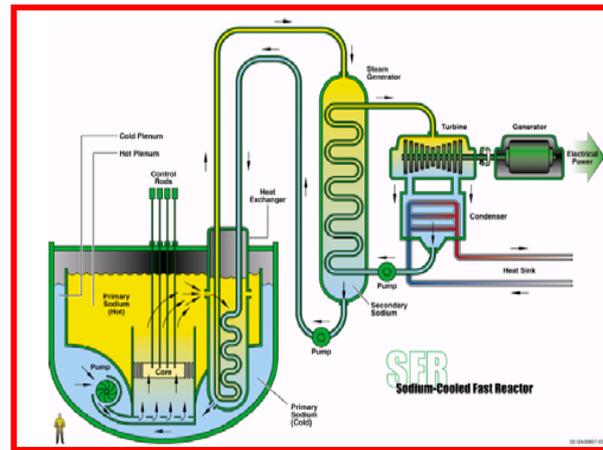
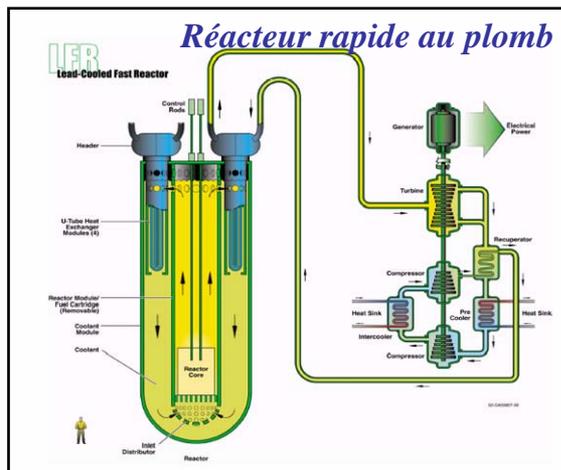
Radioéléments à mesurer	Méthode utilisée	Condition
Emetteurs β/γ (¹³⁷ Cs, ⁶⁰ Co, etc.)	Spectrométrie gamma	Sensibilité suffisante
Plutonium (et/ou uranium)	Spectrométrie gamma	Pas ou peu de ¹³⁷ Cs, ⁶⁰ Co... émetteurs β/γ
	Mesure neutronique passive	- Trop d'émetteurs β/γ - Pas ou peu de curium
	Mesure neutronique active	- Trop d'émetteurs β/γ - Trop de curium



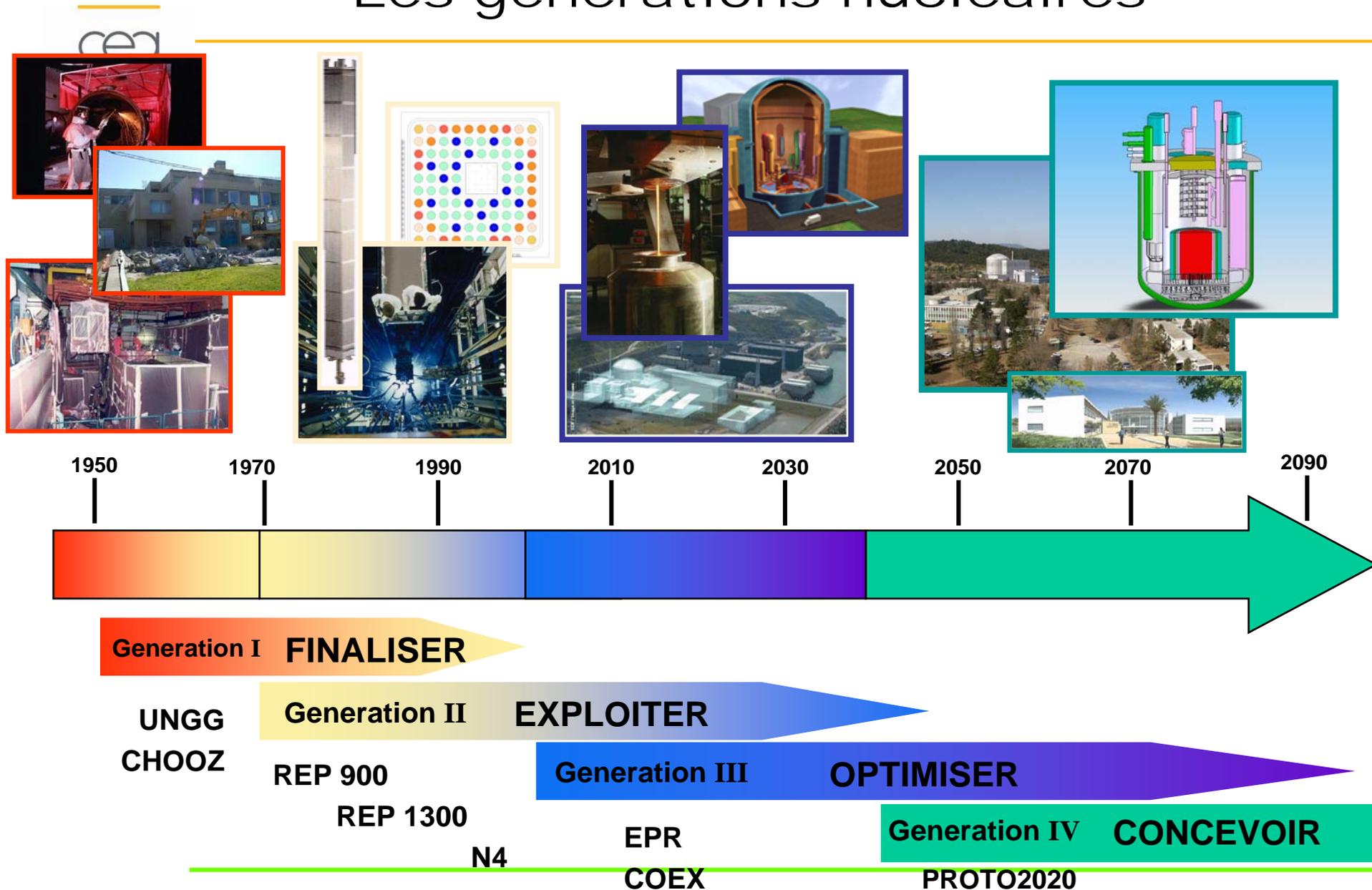
Source ⁶⁰Co (300 GBq)



ET LE FUTUR ?



Les générations nucléaires

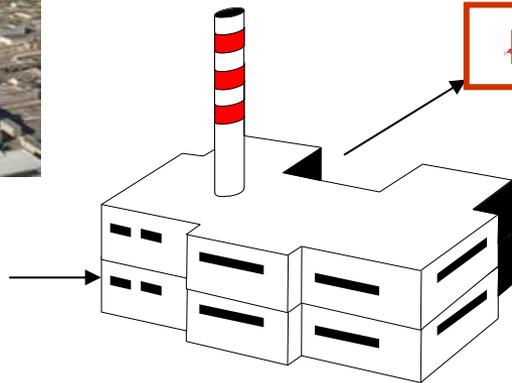


Le Prototype 2020 ASTRID

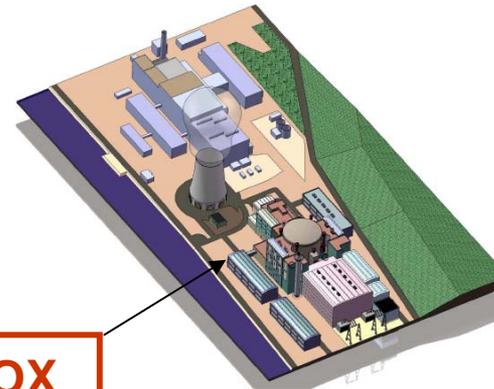
- Réacteur Prototype industriel
- Réacteur d'irradiations expérimentales



U, Pu



MOX

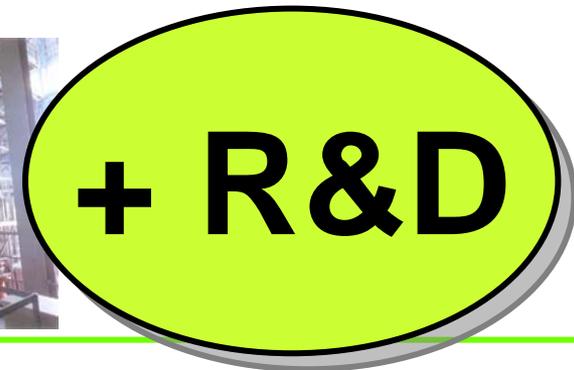


L'Atelier de Fabrication des Cœurs

- Combustible UO_2 - PuO_2 (MOX)
- Quelques tonnes par an

Les tests de composants à l'échelle 1

- Réalisation / rénovation des installations
- Qualification de composants





- Utilisation optimale des ressources en uranium
- Gestion responsables des combustibles usés
- Mise en place de « services » dans le domaine de l'aval du cycle



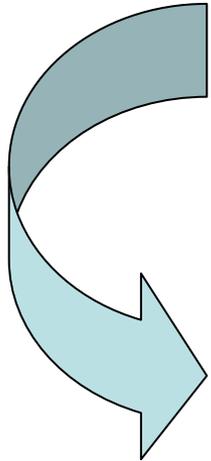
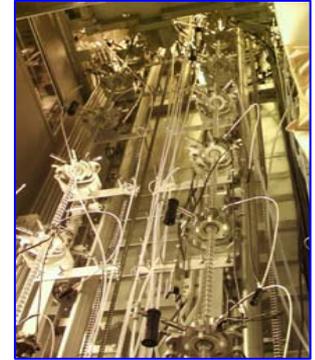
→ **Un cycle fermé devient une nécessité avec :**

- Traitement des combustibles usés
- Vitrification des déchets ultimes
- Recyclage optimisé de l'uranium, du plutonium et des actinides dans les réacteurs de 3^{ème} puis 4^{ème} génération

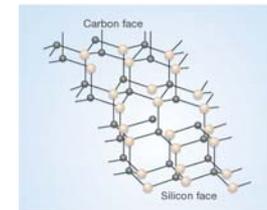


Des usines futures associant traitement des combustibles usés et fabrication de MOX

- des usines plus performantes
- des usines plus sûres
- des usines à rejets limités
- des usines renforcées vis-à-vis des risques de prolifération



- ✓ Instrumentation **plus fiable**,
- ✓ **Mesures plus performantes** (, sensibilité, limite de détection), **plus sûres**,
- ✓ **Techniques adaptées aux nouvelles exigences.**



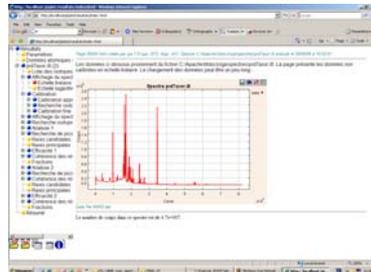
Une instrumentation et des mesure en quasi-rupture avec l'existant

Séparation – transmutation des radionucléides à vie longue

→ - Recyclage des actinides mineurs dans les réacteurs de 4^{ème} génération

Am, Cm fortement émetteurs alpha et neutrons

IGA
(Compo. Isotop.)



- Une instrumentation **plus performante** (forts taux de comptage),
- Des **systèmes de mesures combinées**,
- Des **mesures sélectives et en temps réel.**

FX – L
(Concentr. U-Pu)



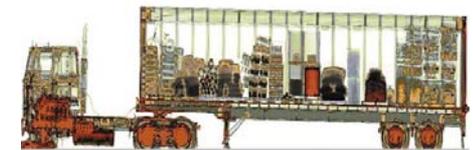
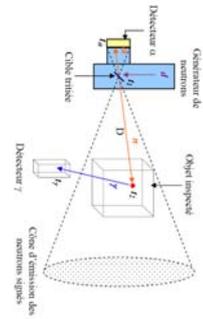
Une vigilance accrue vis-à-vis des risques de prolifération

SMOPY



- des systèmes de surveillance renforcés dans les installations
- des moyens de contrôle aux performances améliorées pour les inspecteurs

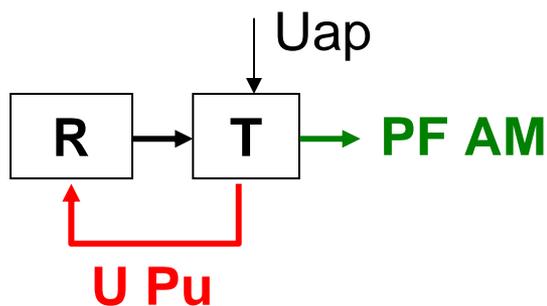
- - Mesures U enrichi, Plutonium, Actinides mineurs
- Contrôles assemblages neufs, irradiés, conteneurs, cuves, poudres, ...



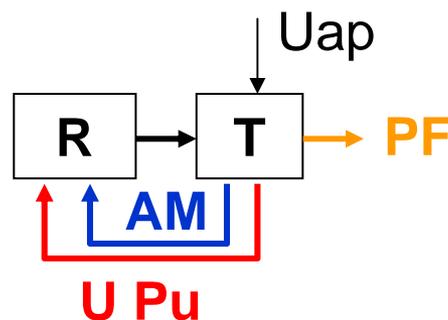
- **Minimisation des déchets**
- **Économie des ressources**
- **Résistance à la prolifération**

50 fois plus d'électricité
avec la même quantité
d'uranium naturel

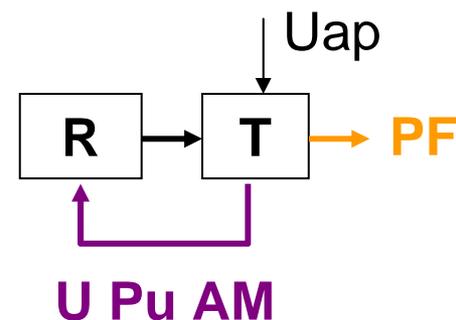
Plusieurs options d'ambition croissante que le prototype 2020 doit permettre d'évaluer au plan technico-économique :



**Recyclage U Pu
seuls**



**Recyclage
hétérogène**



**Recyclage
homogène (GenIV)**

Une approche progressive pour le cycle



energie atomique • energie

2005

Phase 1: recyclage U, Pu

Phase 2: recyclage Gen IV

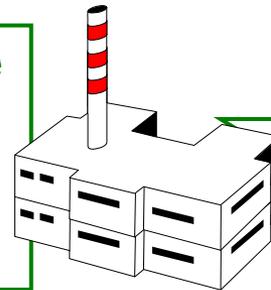
“Bridging
Technologies”

Réacteurs
Gen II / III
(MOX)



2020

Usines cycle
Gen IV
(Procédés
avancés)



2040+

Technologies de cycle
avancées (Gen IV)

Réacteurs
Gen IV



Des technologies du cycle adaptées
aux générations de réacteurs

Les chantiers de démantèlement : un objectif de fond pour les mesures nucléaires



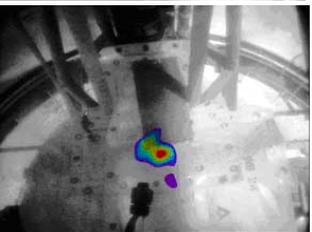
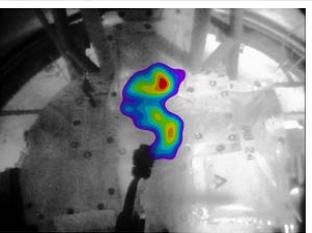
energie atomique • energies alternatives

- Mesures et localisation d'activités (points chauds, gamma – caméra)
- Quantification de matière résiduelle (criticité)
- Mesures d'effluents d'assainissement et de rinçage
- Mesures de déchets solides (décatégorisation, caractérisation déchets TFA, FA, MA, alpha, graphite (36cl), mesure colis,...)
- Mesures β , γ de suivi d'écroutage et d'état final
- Radioprotection des travailleurs en intervention

ISOCS



Systèmes de mesures et de détection plus performants (limite de détection), **plus manipulables**, plus résistants pour une **caractérisation améliorée** (nouveaux émetteurs à vie longue, tritium,...)



Aspect environnemental

- Mesures environnementales (eau, air, aliments...)
- Caractérisation de site
- Diminution des rejets liquides et gazeux
- Contrôle des déchets et matières non radioactives (sortie de site)



→ Systèmes et méthodes de mesures
plus précis et garanti,
plus performants (limites de détection),
plus rapides et discriminants

Aspect sociétal

- personnels d'intervention et de maintenance
- personnels des chantiers d'assainissement et de démantèlement
- personnels des usines du cycle (teneur et composition isotopique du Pu, actinides mineurs, URT...)
- protection des personnels en cas d'accident (criticité)

EDAC



-
- **Système de dosimétrie passive et opérationnelle plus performants**
(limite de détection, multi rayonnement)
 - **Système de contrôle en sortie de zone plus rapides et plus sensibles**
 - **Système de détection de criticité (EDAC) plus performants**



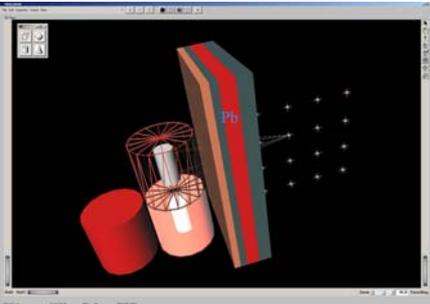
Mais aussi, développer une nouvelle génération de capteurs et systèmes de mesure



energie atomique • energies alternatives

Dans bien des cas, les technologies du début du nucléaire sont encore présentes et le retard avec l'instrumentation dans les autres domaines industriels devient critique

MERCURAD



Introduire les technologies du 21ème siècle dans l'instrumentation nucléaire :

- Capteurs intelligents
- Réseaux sans fil, nouvelles technologies de transmission
- Télétraitement, représentation vidéo
- Aide à l'opération...

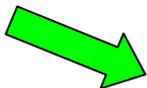
CONCLUSION

cea

energie atomique • énergies alternatives



**L'énergie nucléaire
pour le XXIème siècle**



Le futur du Nucléaire passe par une sûreté davantage renforcée et une généralisation du cycle fermé avec recyclage

RENAISSANCE

*Éviter l'accumulation
de combustible usé !*

**Traitement et recyclage
dans les réacteurs
de 3^{ème} génération**

DURABLITE

*Optimiser les ressources
et la gestion des déchets*

**Réacteurs de 4^{ème} génération
et options de cycle adaptées**

La mesure et l'instrumentation nucléaire auront un rôle majeur dans les cycles du combustible du futur

Merci de votre attention

