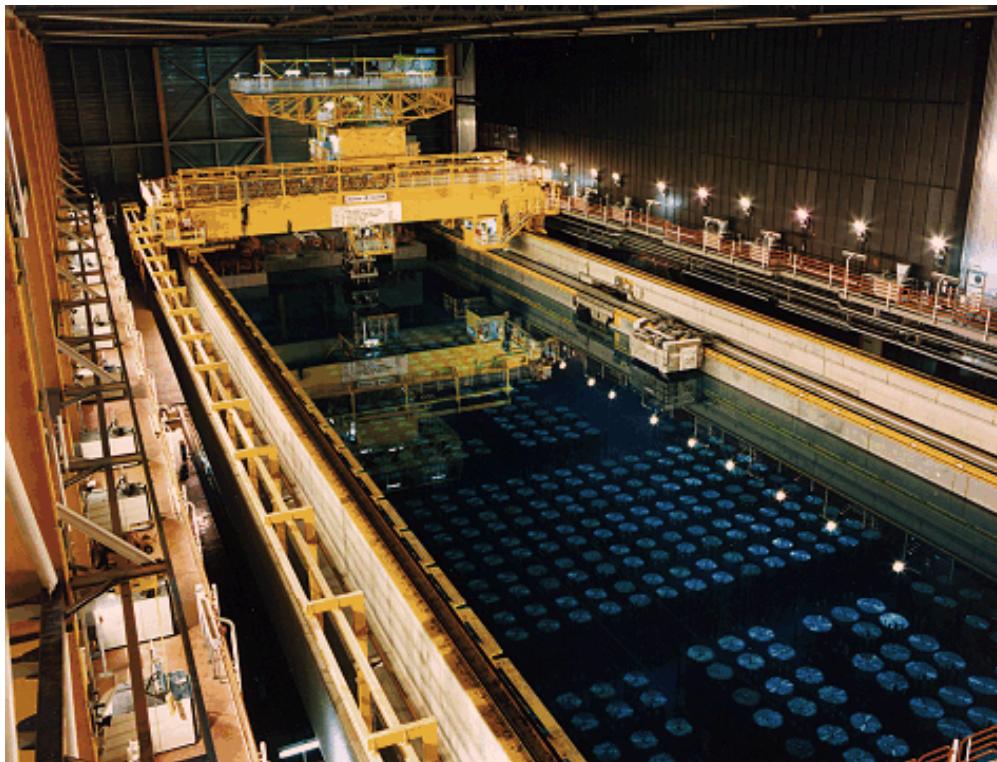


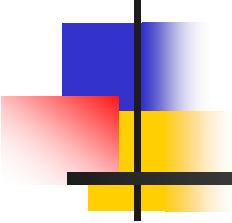
Risque de stockage des déchets nucléaires

Jean-Raynald de Dreuzy, chargé de recherche CNRS

UMR 6118 *Géosciences Rennes / IFR CAREN*

- Problématique: Durée de vie longue, Toxicité importante

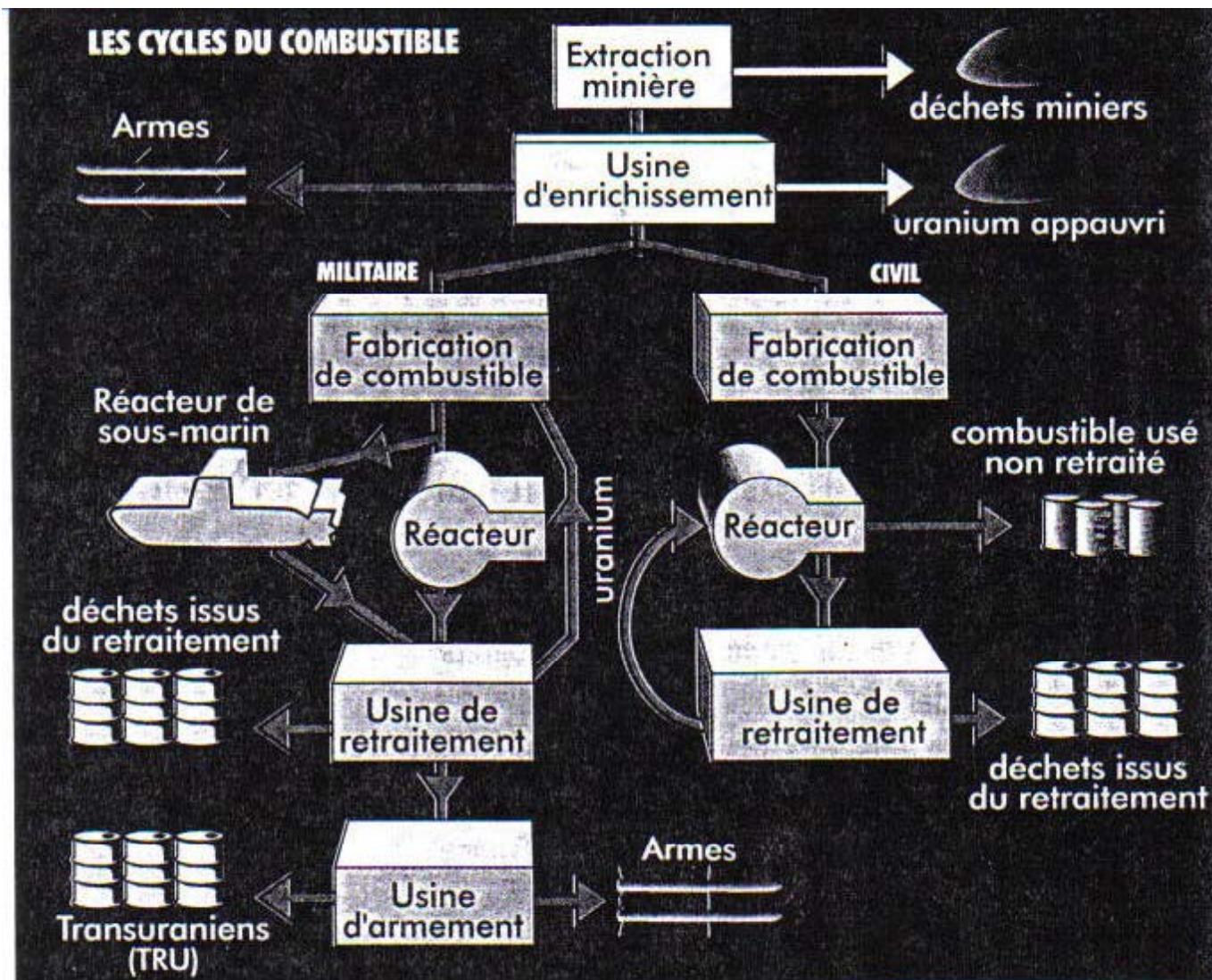




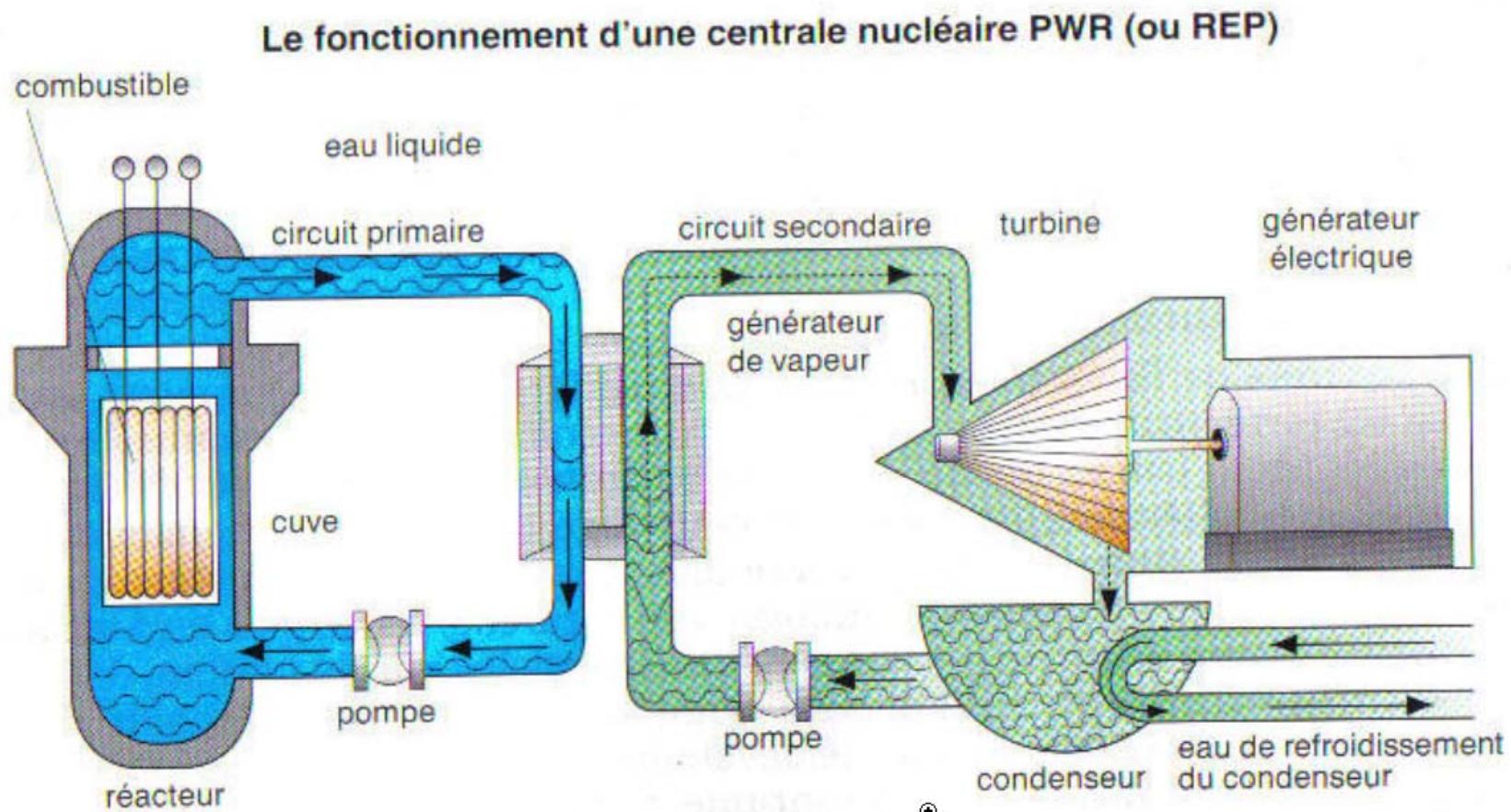
Gestion et enjeux du stockage des déchets nucléaires de longue durée de vie

- Provenance des déchets nucléaires
- Possibilités envisagées des déchets de longue durée de vie: avantages et inconvénients
- Le stockage dans des couches géologiques profondes
 - Comment estimer l'occurrence d'un relargage atmosphérique
 - Vulnérabilité liée à la radioactivité
- Politique, communication et perception du risque lié aux déchets nucléaires
- Quelques pistes pour une exploitation durable de l'énergie nucléaire

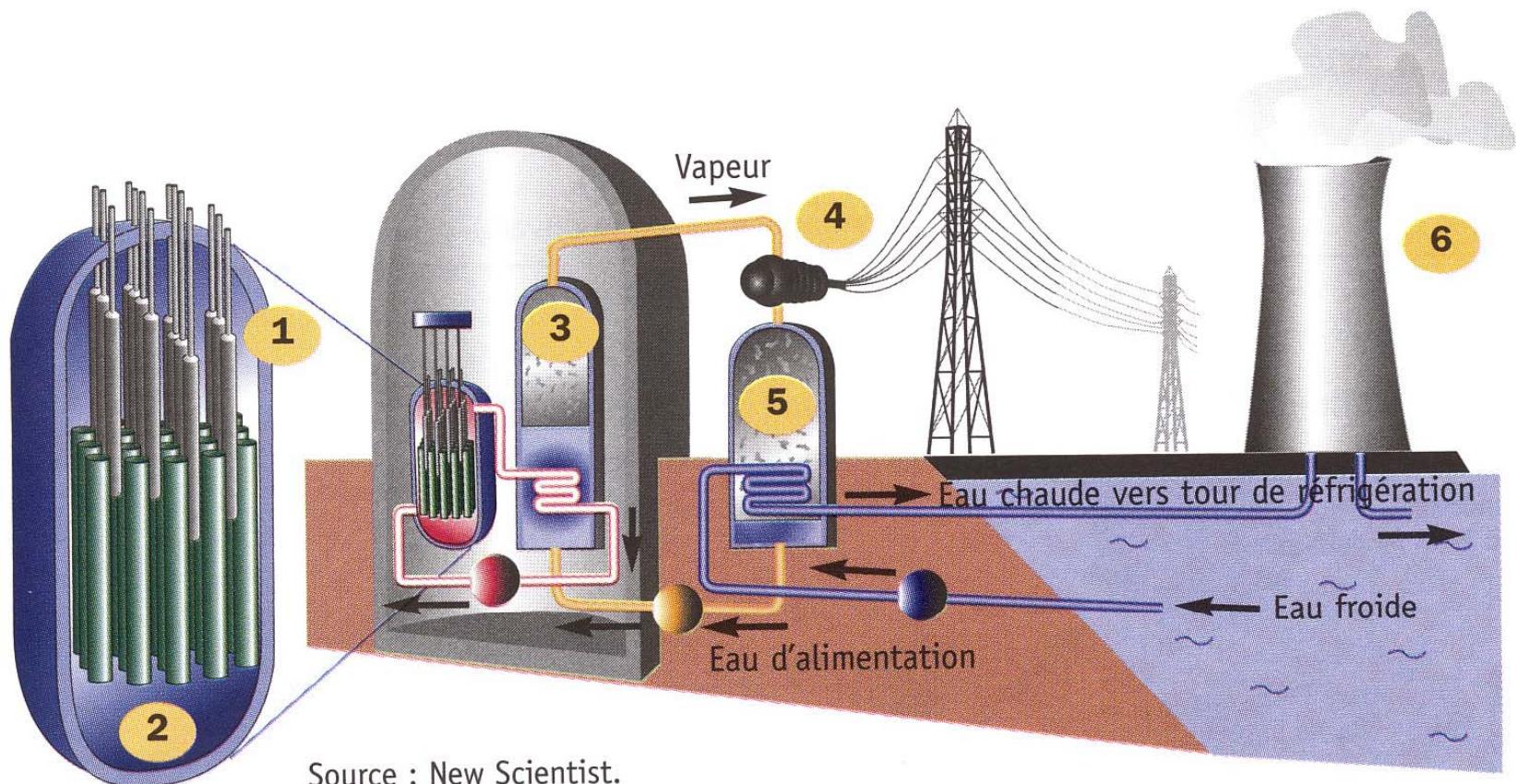
Origine des déchets nucléaires



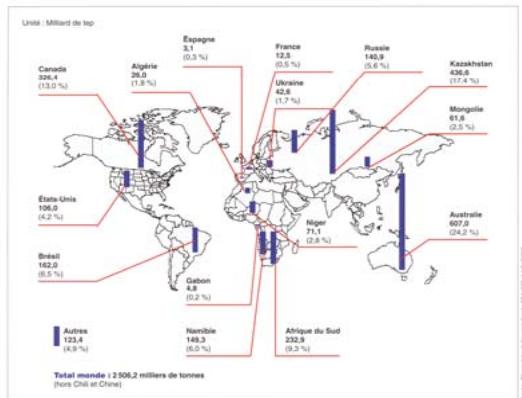
Fonctionnement d'une centrale nucléaire



Fonctionnement d'un réacteur à eau sous pression (REP)

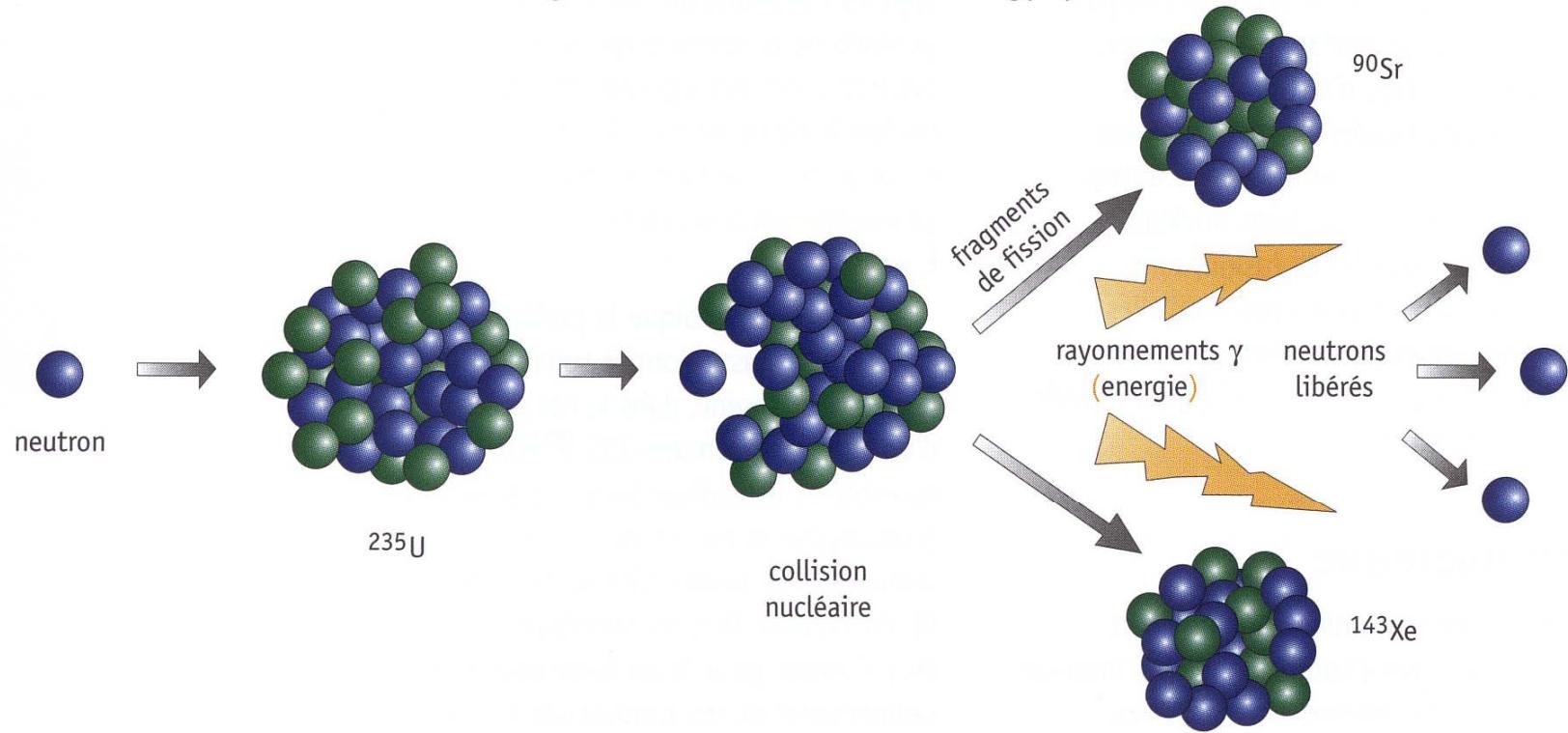


Le nucléaire: une énergie des pays riches

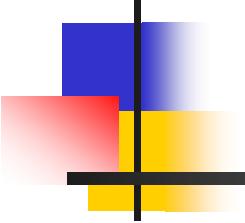


- Construction difficile à maîtriser
- Risque/Sûreté fonction de l'organisation sociale
- Uranium détenu en majeure partie par les pays de l'OCDE

Origine de l'énergie nucléaire



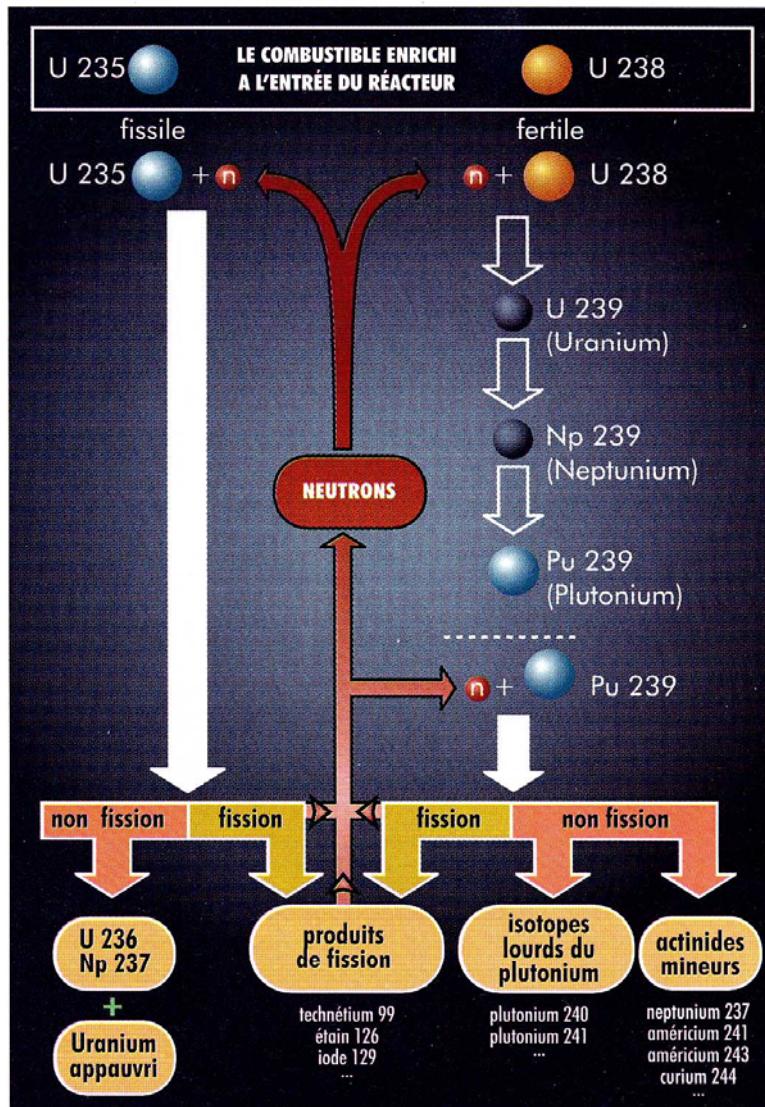
État critique du réacteur
Utilité des neutrons retardés



Composant des centrales nucléaires

- **combustible:** matières fissiles et fertiles)
- **caloporpateur:** évacuation de l'énergie
 - eau, eau lourde (D_2O)
 - gaz :hélium- CO_2
 - métaux: liquides sodium),
- **modérateur**
 - eau, eau lourde, graphite: réacteur à neutrons thermique.
 - rien: réacteurs à neutrons rapides
- **absorbant neutronique:** contrôler la réaction en chaîne
 - barres de contrôle: bore

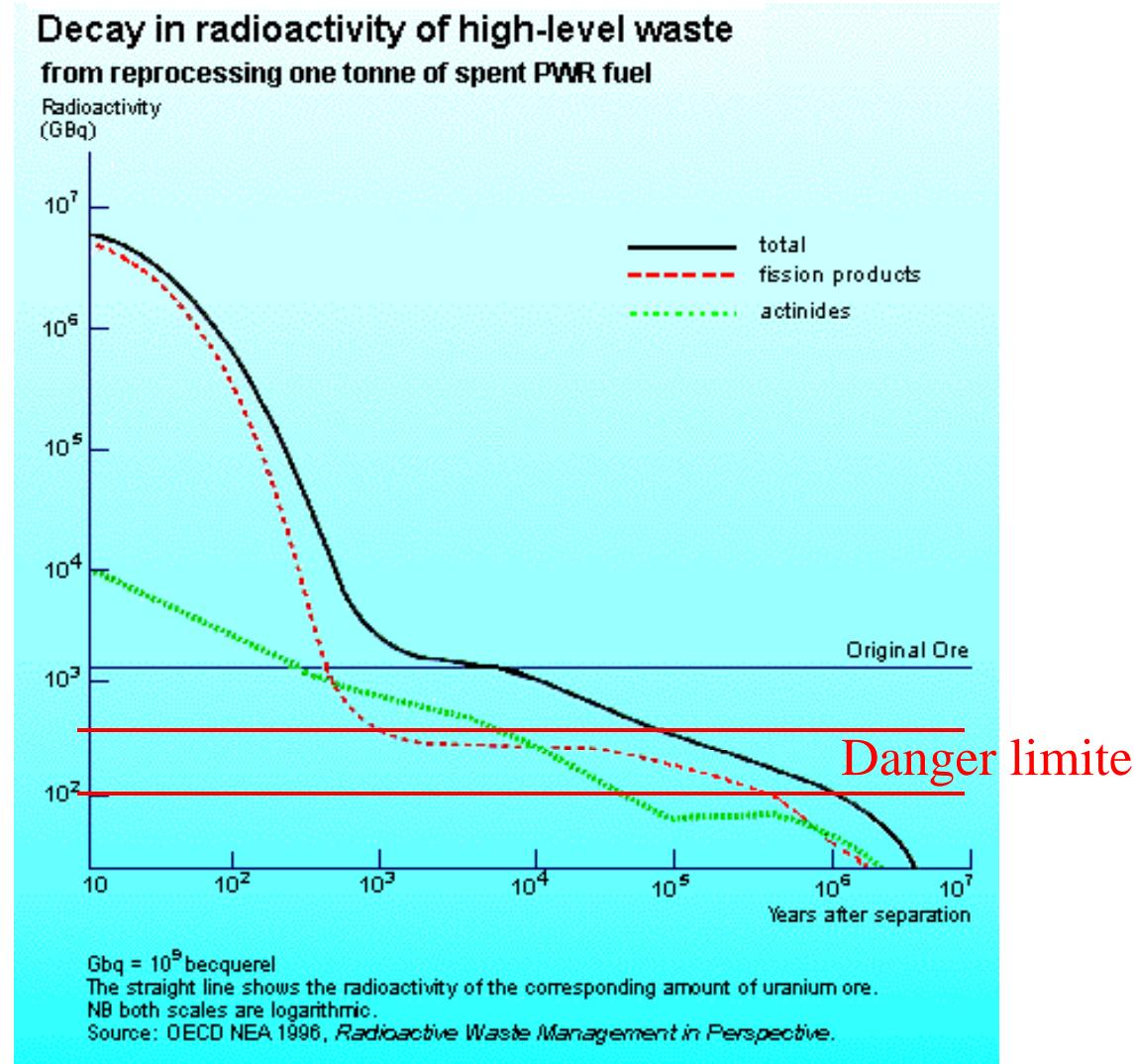
Cycle de vie du combustible nucléaire



Chaîne de décroissance radioactive

| URANIUM 238 (U238) RADIOACTIVE DECAY | | |
|---|-------------------|--------------------|
| type of radiation | nuclide | half-life |
| α | uranium-238 | 4.47 billion years |
| β | thorium-234 | 24.1 days |
| β | protactinium-234m | 1.17 minutes |
| α | uranium-234 | 245000 years |
| α | thorium-230 | 8000 years |
| α | radium-226 | 1600 years |
| α | radon-222 | 3.823 days |
| α | polonium-218 | 3.05 minutes |
| α | lead-214 | 26.8 minutes |
| β | bismuth-214 | 19.7 minutes |
| β | polonium-214 | 0.000164 seconds |
| α | lead-210 | 22.3 years |
| β | bismuth-210 | 5.01 days |
| β | polonium-210 | 138.4 days |
| α | lead-206 | stable |

Devenir des déchets de longue durée de vie (1 000 ans, 10 000 ans, 100 000 ans?)



Cycle de vie du combustible nucléaire

| LES PRINCIPAUX DÉCHETS DES CENTRALES | | |
|---|--|----------------------|
| CAS D'UN REP 900, À UN TAUX DE COMBUSTION DE 33000 MWJ/T ET À 3,5% D'ENRICHISSEMENT | | |
| RADIONUCLÉIDES | PÉRIODE (années) | DÉCHARGEMENT (kg/an) |
| URANIUM : | | |
| ²³⁵ U | $7,08 \cdot 10^8$ | 221 |
| ²³⁶ U | $2,34 \cdot 10^7$ | 88 |
| ²³⁸ U | $4,47 \cdot 10^9$ | 20 204 |
| PLUTONIUM : | | |
| ²³⁹ Pu | 24 119 | 123,1 |
| ²⁴⁰ Pu | 6 569 | 47,5 |
| ACTINIDES MINEURS | | |
| ²³⁷ Np | $2,14 \cdot 10^6$ | 8,8 |
| ²⁴¹ Am | 432,2 | 4,4 |
| ²⁴³ Am | 7 380 | 2,2 |
| ²⁴⁵ Cm | 8 500 | 0,06 |
| PFVM | (Produits de Fission à Vie Moyenne ≤ à 30 ans) | |
| ⁹⁰ Sr | 28 | 10,5 |
| ¹³⁷ Cs | 30 | 24,3 |
| TOTAL PFVM | | 34,8 |
| PFVL | (Produits de Fission à Vie Longue ≥ à 30 ans) | |
| ⁷⁹ Se | 70 000 | 0,11 |
| ⁹¹ Zr | $1,5 \cdot 10^6$ | 15,5 |
| ⁹⁹ Tc | $2,1 \cdot 10^5$ | 17,7 |
| ¹⁰⁷ Pd | $6,5 \cdot 10^6$ | 4,4 |
| ¹²⁶ Sn | 10^5 | 0,44 |
| ¹²⁹ I | $1,57 \cdot 10^7$ | 3,9 |
| ¹³⁵ Cs | $2 \cdot 10^6$ | 7,7 |

- Que faire des produits de fissions et des noyaux plus lourds non recyclables
Monde: de 8 000 à 20 000 tonnes par an

Le retraitement

A CHACUN SA POLITIQUE

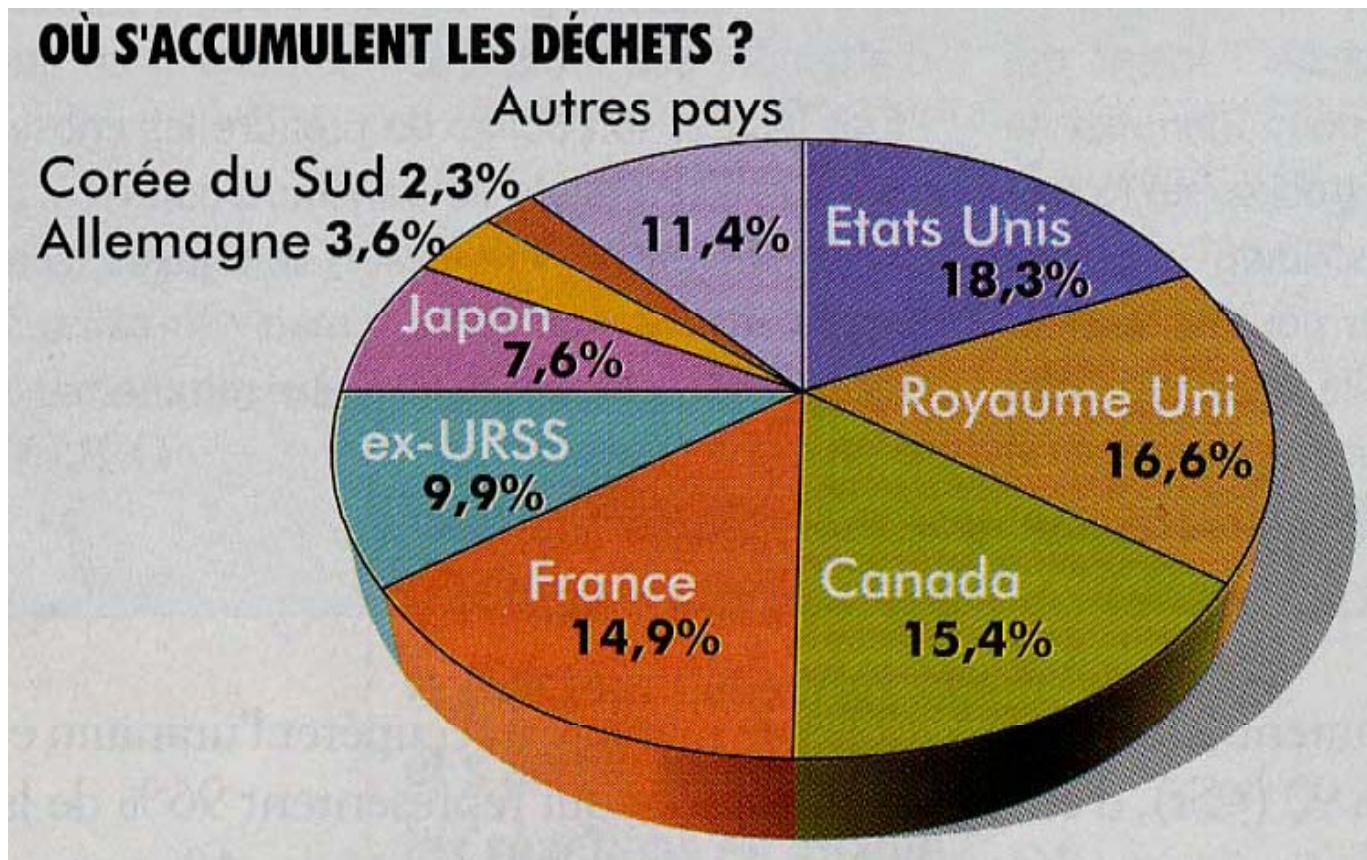
| Pays | Cl déchargés (tonnes) ^a | Cl retraités (tonnes) ^b | politique de gestion des Cl | puissance installée (GWé) ^c | port de nucléaire (%) ^c |
|-------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|--|------------------------------------|
| ETATS-UNIS | ≈28600 | | ST | 98,8 | 22,0 |
| FRANCE | 11700 | 2518 | R,(E) | 58,5 | 76,4 |
| JAPON | ≈8600 | 1082 | RE,R | 38,9 | 27,2 |
| ALLEMAGNE | 6315 | 2706 | RE,E | 22,7 | 29,3 |
| SUÈDE | ≈3240 | | ST | 10,0 | 51,1 |
| ESPAGNE | 1775 | | E | 7,1 | 35,0 |
| BELGIQUE | 1400 | 403 | RE,E | 5,5 | 55,8 |
| SUISSE | ≈1300 | 285 | RE,E | 3,0 | 36,8 |
| FINLANDE | ≈975 | | E | 2,3 | 29,5 |
| ROYAUME-UNI | | | R,E? | 11,7 | 25,8 |
| CANADA | | | ST | 15,8 | 19,1 |
| PAYS-BAS | 150 | 162 | RE,E | 0,5 | 4,9 |

R: retraitement dans le pays RE: retraitement à l'étranger E: entreposage en attente de décision ST: stockage direct de combustibles usés

a. Valeurs cumulées jusqu'en 1995 (source CEE); en italique, données estimées à partir de la production cumulée d'électricité d'origine nucléaire (source CEA,1992) et en prenant une moyenne de 4,2 tonnes de Cl par TWhé* (cas de l'Allemagne).

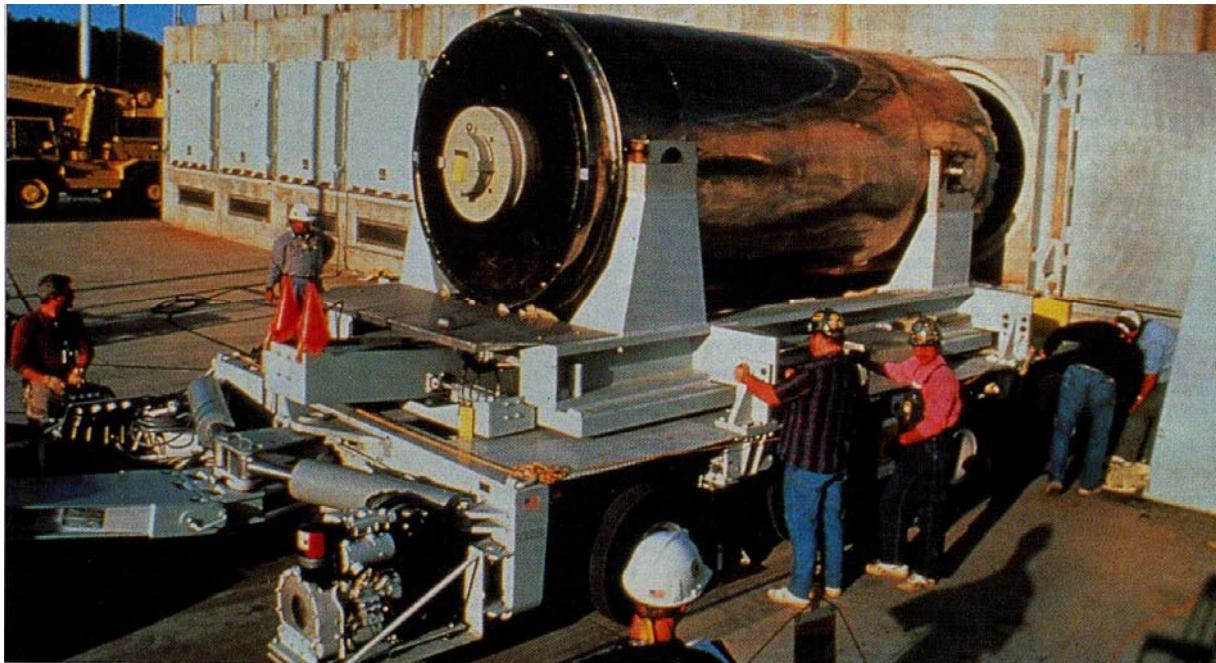
b. A La Hague, Cl oxydes cumulés jusqu'au 1^{er} mars 1995 (source COGEMA). c. Situation au 1^{er} janvier 1995 (source AIEA).

Déchets par pays

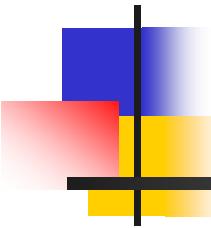


- Total des déchets nucléaires américains: $(2.3\text{km})^2 * 1\text{m}$
- Coût du nettoyage des sites militaires américains: 189 à 265 Milliards \$

Entreposage en surface des déchets de courte durée de vie (<100 ans)



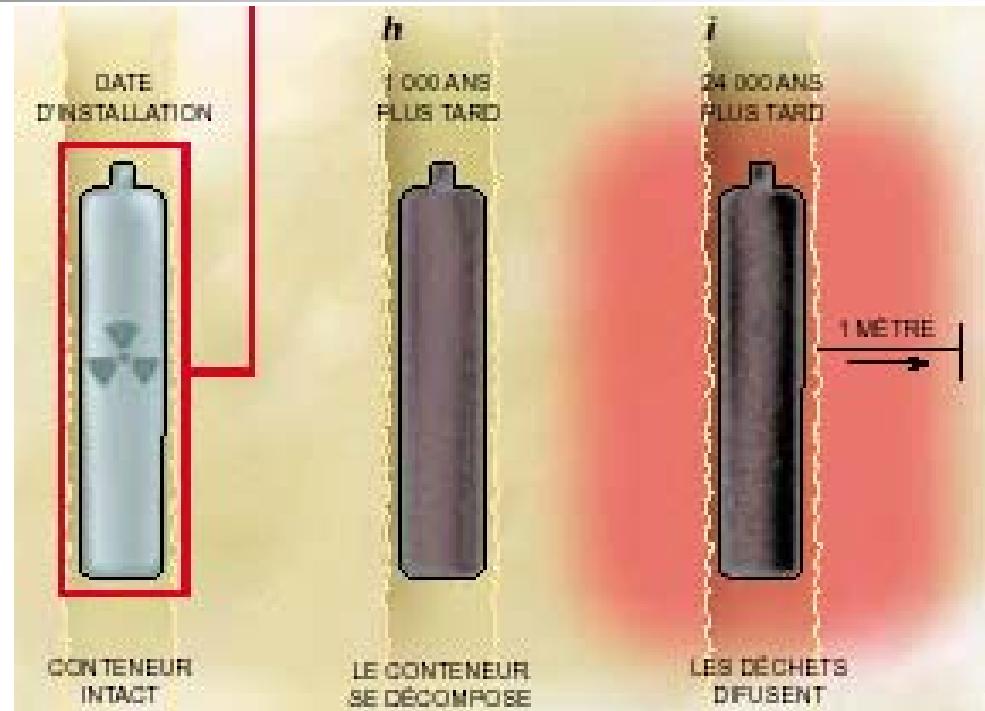
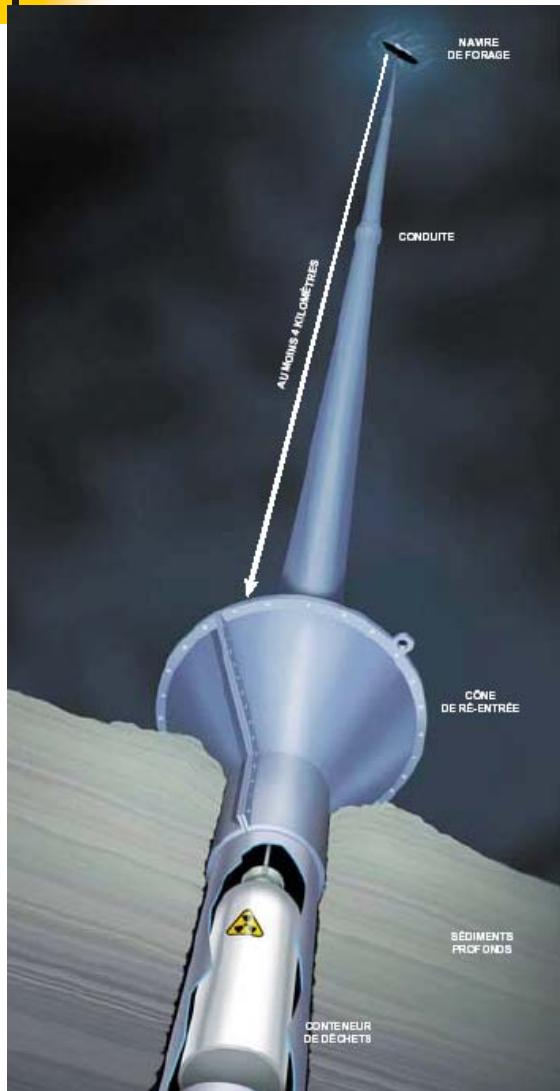
- Les avantages: surveillance, réversibilité
- Les inconvénients
 - Accidents, Prise directe avec le milieu naturel
 - Surveillance assurée sur des durées limitées (<100 ans)



Gestion des déchets de longue durée de vie

- Transmutation: la solution historique
 - Impossible pour les produits de fission
- Entreposage en surface
- Stockage profond
 - Avantages: sûreté passive, confinement, dilution si...
 - Inconvénients: réversibilité difficile, milieu mal connu, mémoire
- Fonds océaniques

Stockage dans les fonds océaniques



- Avantages : Milieu en sédimentation, Risque d'intrusion humaine quasi-nulle, faisabilité technique, dilution si...
- Inconvénients : irréversibilité, Législation internationale

Stockage dans les fonds océaniques

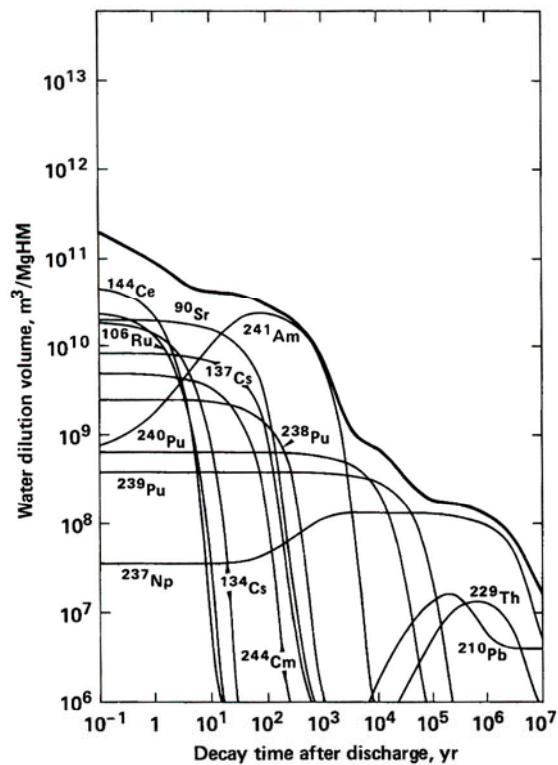
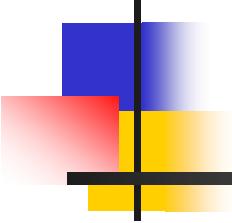
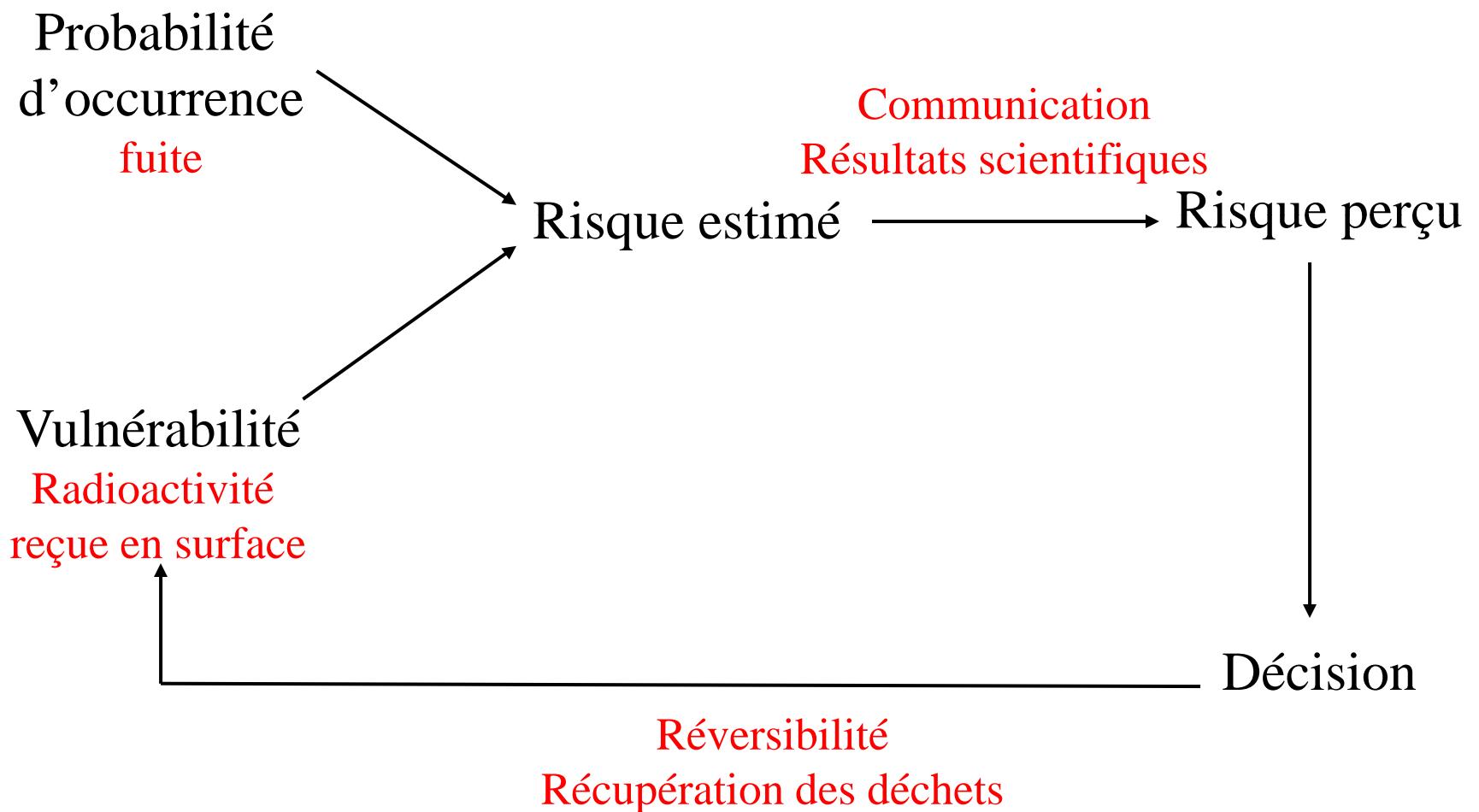


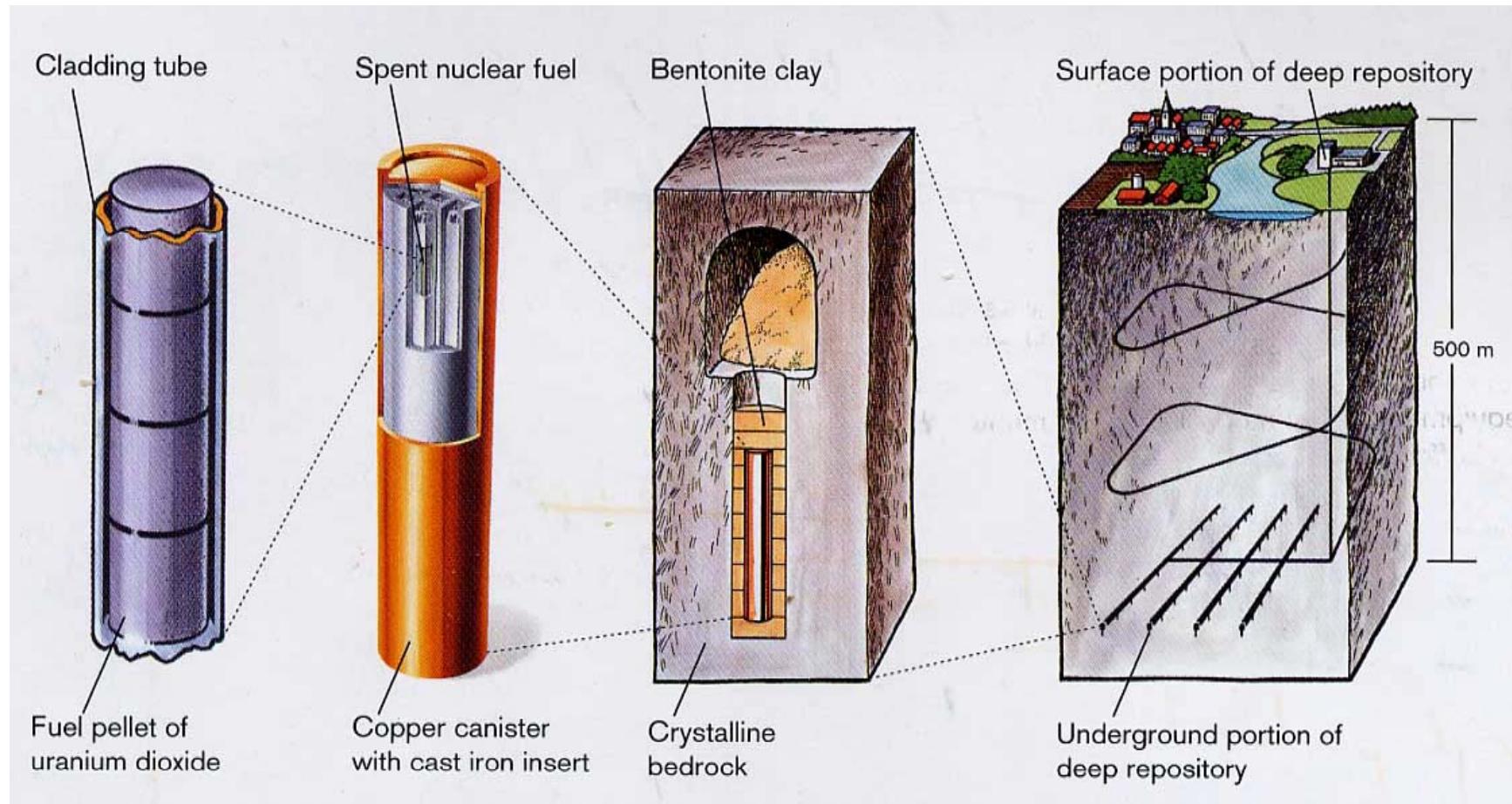
FIGURE 13–25 Water dilution volume of PWR spent fuel. Diagram shows how much water would have to be mixed with the amount of a specific radionuclide (e.g., ^{90}Sr) found in a PWR fuel assembly to reduce the concentration of that nuclide to a safe level. (The fuel assembly used for this figure is one containing 1 megagram heavy metal (MgHm). It is expected that a full nuclear waste repository would contain 10^5 MgHm. (USNRC 1983)



Le risque de stockage des déchets nucléaires



Principe du stockage dans les couches géologiques: barrières successives



Principe du stockage dans les couches géologiques

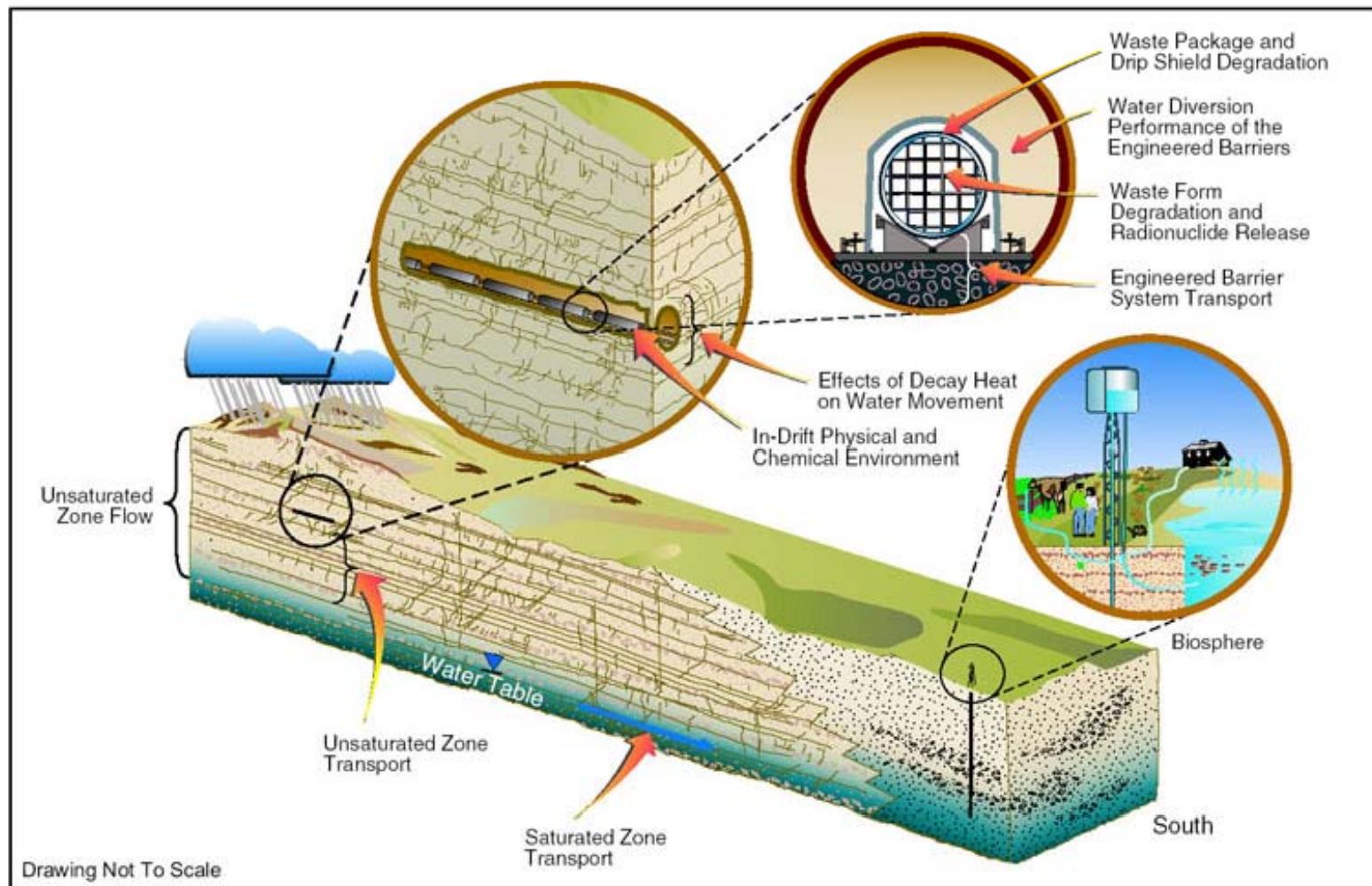
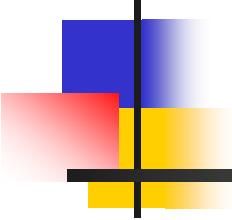
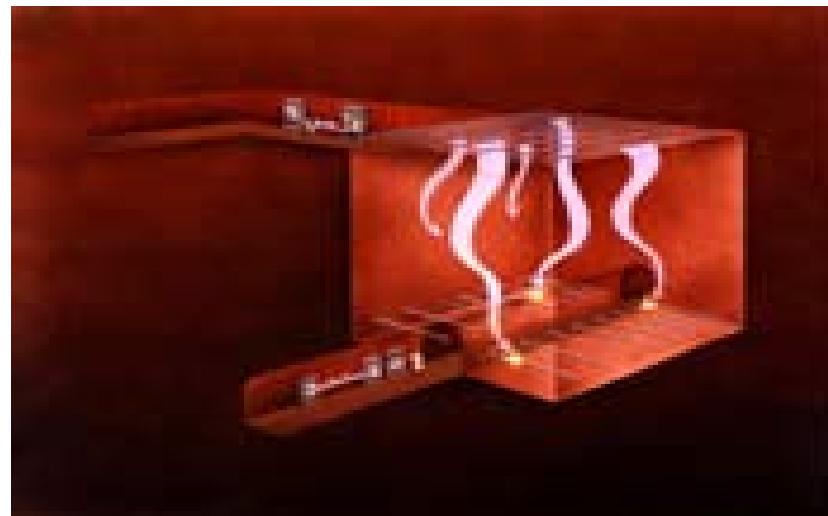


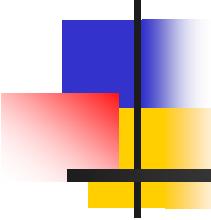
Figure S-22. Schematic illustration of the processes modeled for Total System Performance Assessment.



Effet du stockage sur le milieu géologique

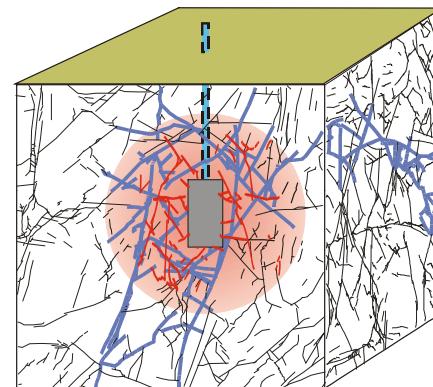
- Modifications géologiques des sites
 - Risques sismiques
- Effets des changements climatiques
 - Modification de l'érosion (Site du Gard, France)
 - Modification de l'infiltration (Yucca Mountain, USA)
- Thermo-Hydro-Mechanical-Coupling (THMC)



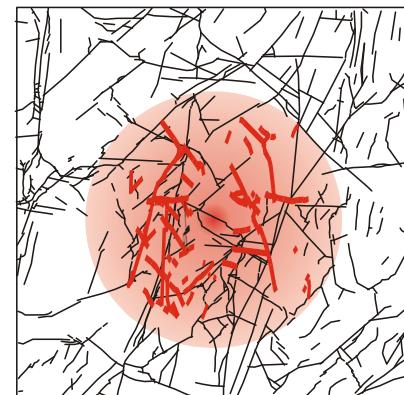


Comment estimer la probabilité d'occurrence d'une fuite?

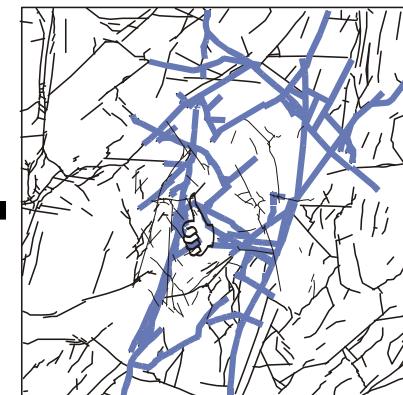
- Caractérisation et modélisation prédictive



+



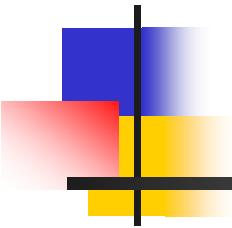
+



structure: géologie

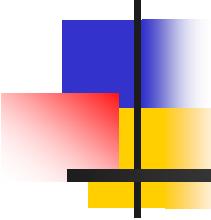
structures induites

flux / fuites



Milieux géologiques envisagés

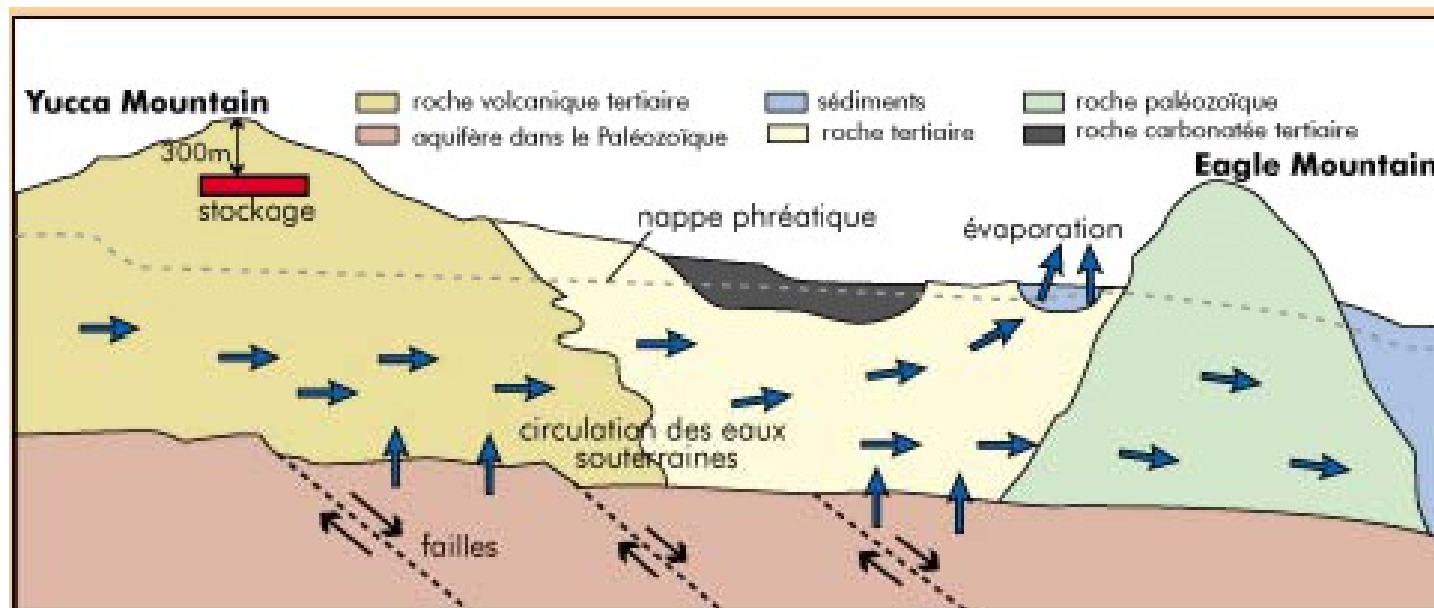
| | + | - |
|---------|---|--|
| Sel | <ul style="list-style-type: none"> • Roche plastique • Imperméabilité par plasticité • Contient peu d'eau | <ul style="list-style-type: none"> • Ressources pouvant intéresser les générations futures • Bloque l'évacuation des gaz • Proximité de couches sédimentaires susceptibles d'être prospectées |
| Argile | <ul style="list-style-type: none"> • Roche plastique • Fort pouvoir de confinement • Ralentit la migration des radionucléides par échange d'ions | <ul style="list-style-type: none"> • Isolant thermique • Contient beaucoup d'eau • Perd progressivement ses propriétés plastiques • Proximité de couches sédimentaires susceptibles d'être prospectées |
| Granite | <ul style="list-style-type: none"> • Résistance mécanique élevée • Fort pouvoir de confinement • Peu de risque de prospection | <ul style="list-style-type: none"> • Effet inconnu des circulations dans les fractures • Répond à la tectonique par une déformation fragile |



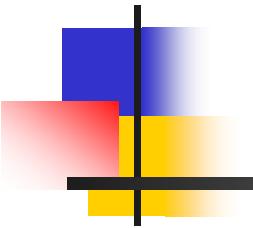
Comment estimer la probabilité d'occurrence d'une fuite?

- Méthode d'estimation
 - Caractérisation du milieu et connaissance des circulations hydriques
 - Définition des phénomènes à modéliser (THMC+)
 - Modélisation pour extrapoler sur les durées requises
- Problèmes de l'estimation
 - Méconnaissance du milieu naturel
 - Instabilité des phénomènes

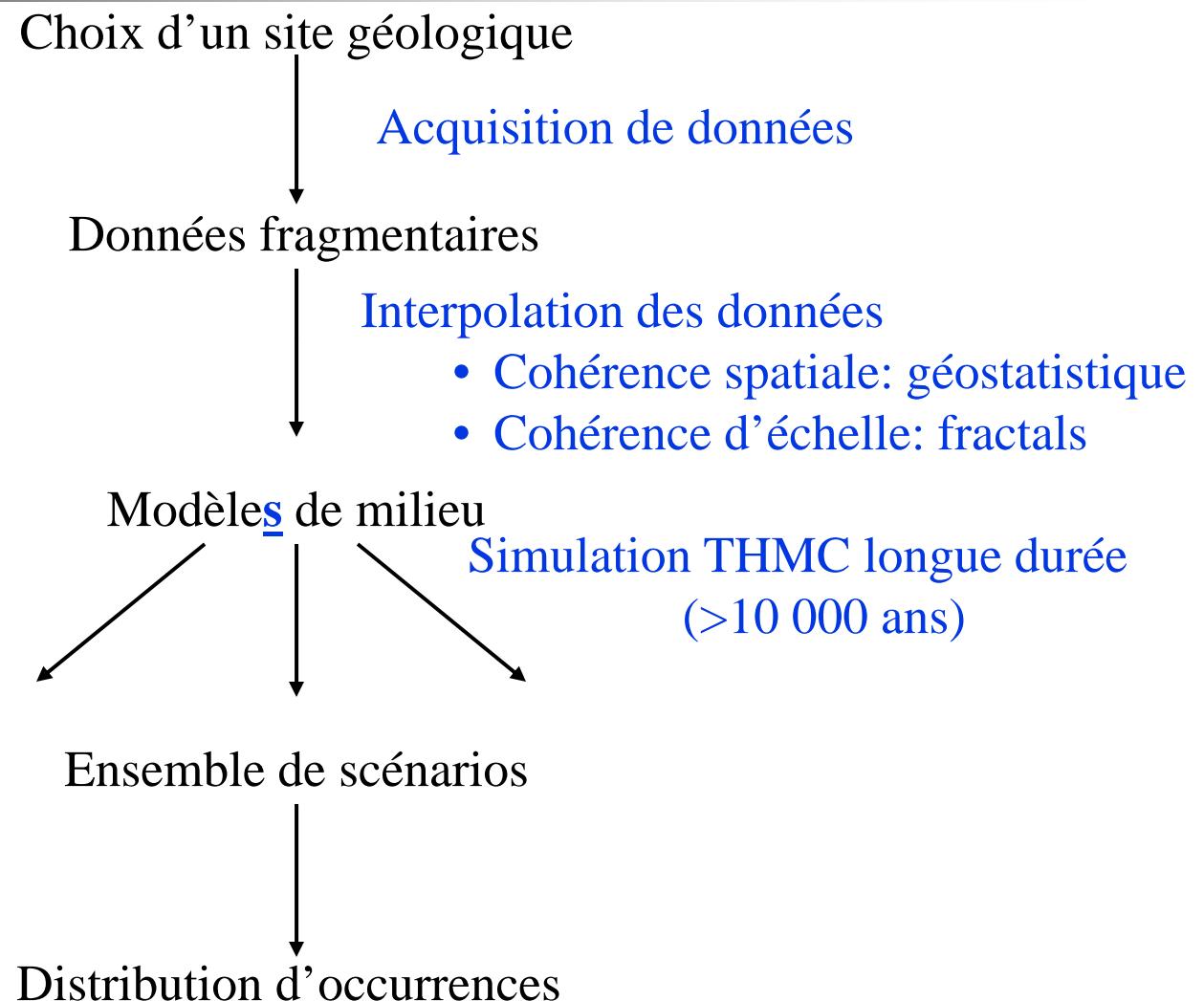
Circulations hydriques



- Les circulations souterraines naturelles dépendent
 - des variations spatiales des précipitations (effets orographiques, ...)
 - de la géométrie des interfaces (topo, socle, ...)
 - des écoulements de surface et évaporations
 - de la structure des milieux souterrains

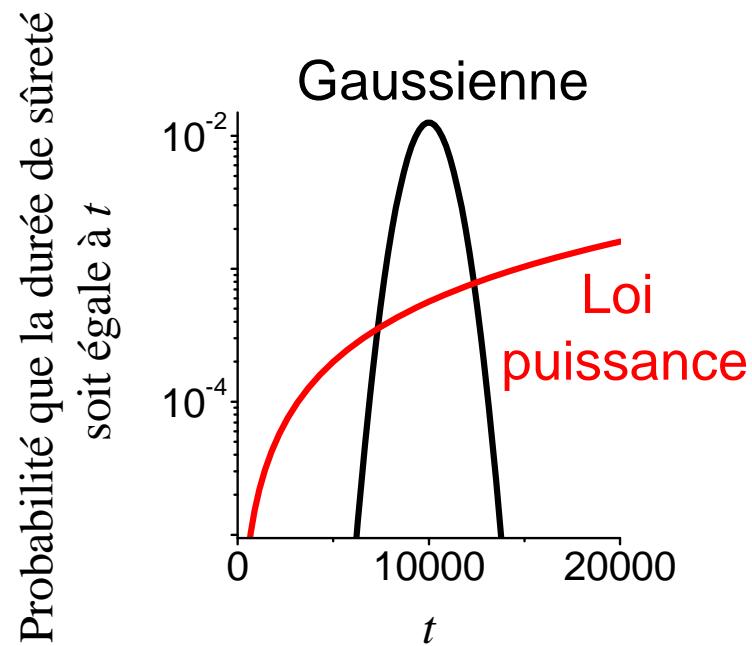


Modèle de milieu et simulation prédictive



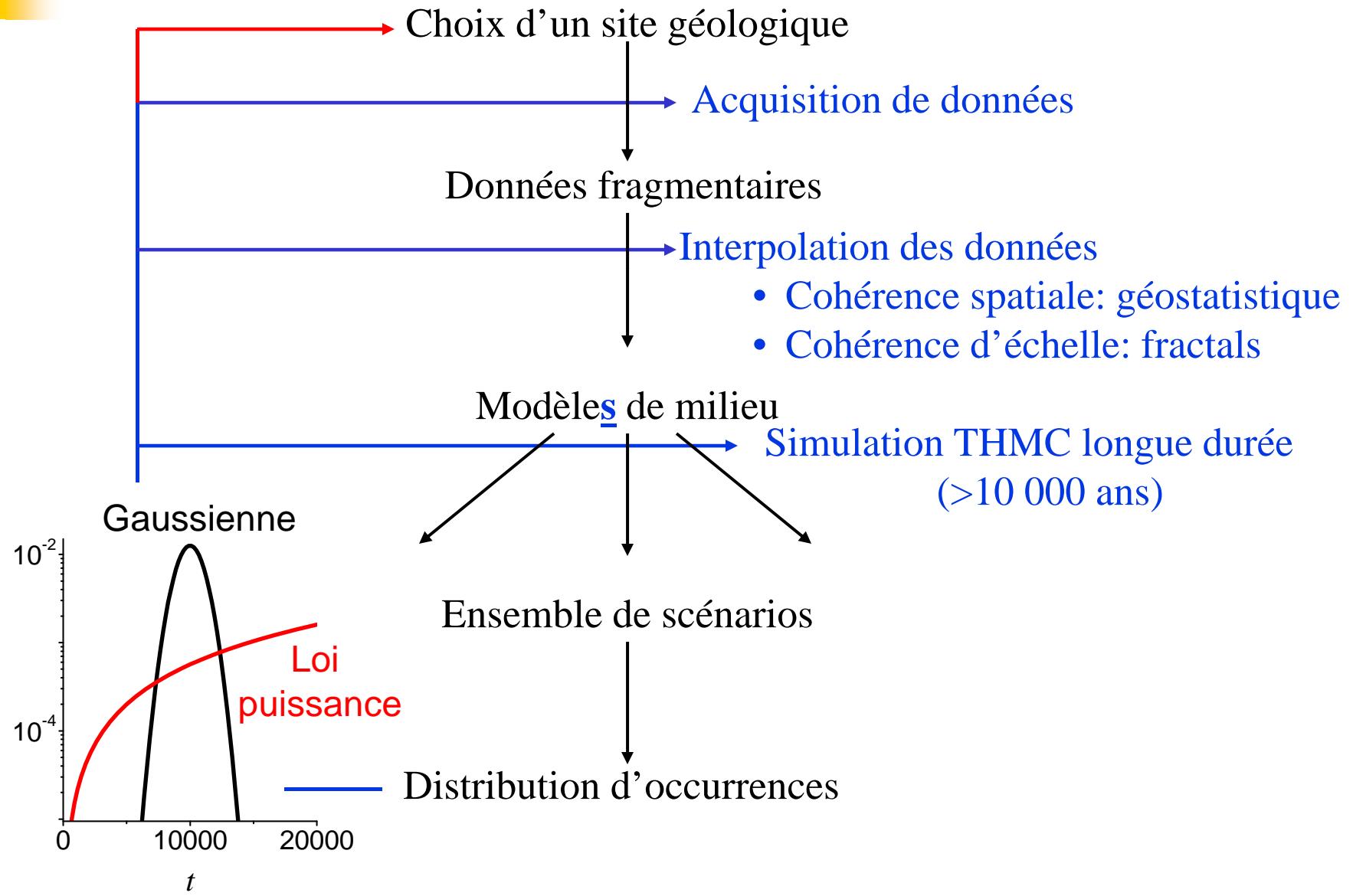
Modèles de milieu et simulation prédictive

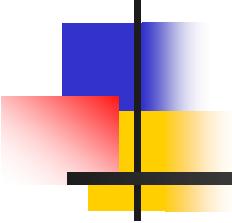
$$P_i(\text{sureté} = t) = f_{\text{Modèle de Milieu}}(\mu, \sigma, \text{distribution}) \cdot f_{\text{Physique}}(\text{instabilité})$$



Modèle de milieu et simulation prédictive

Probabilité que la durée de sûreté
soit égale à t



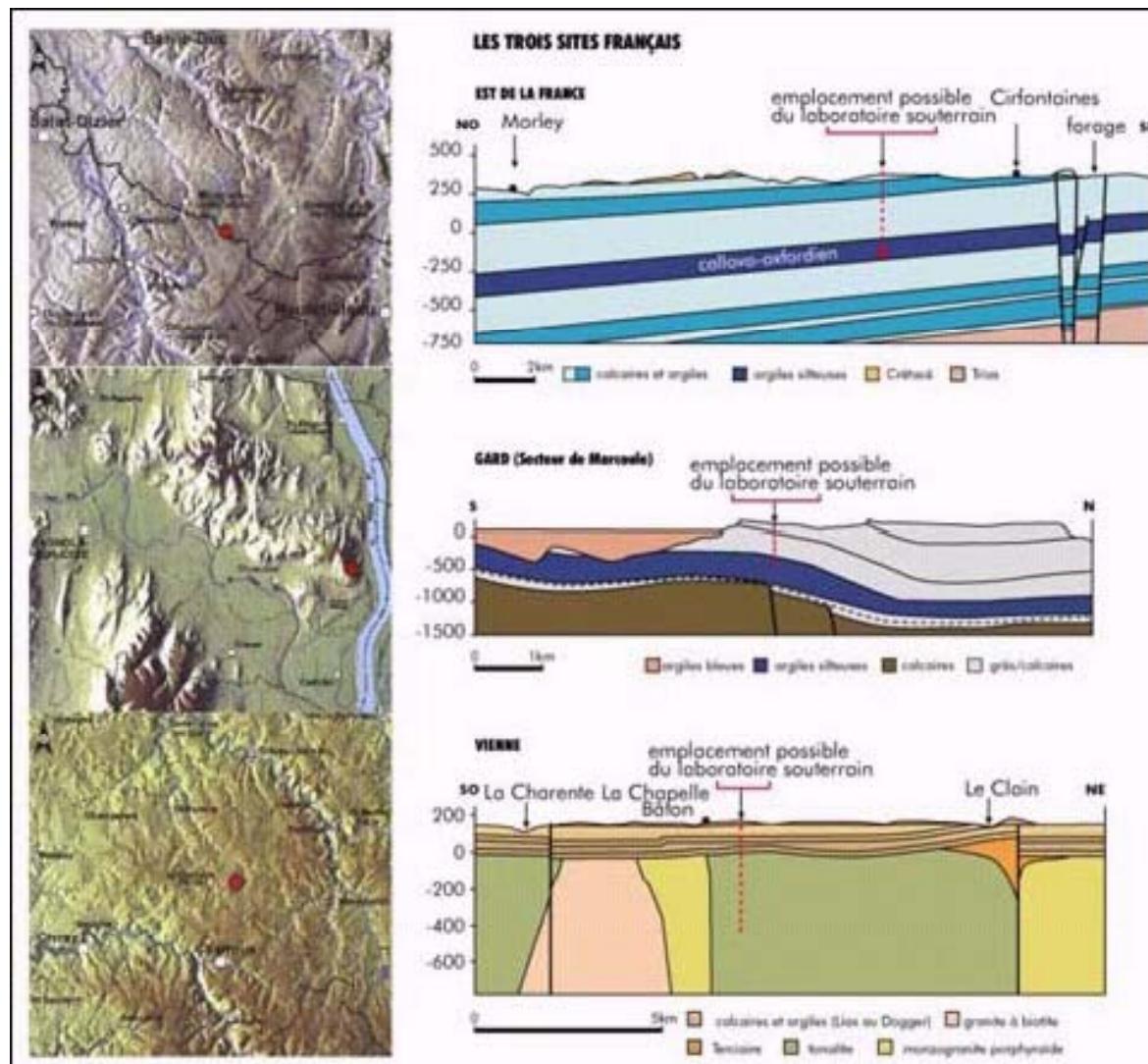


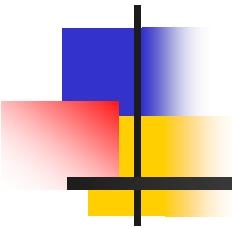
État d'avancement des études

| Waste Management for Spent Fuel from Nuclear Power Reactors | | |
|---|-----------|--|
| Country | Policy | Facilities and progress towards final repositories |
| Belgium | R | Underground repository laboratory established. Construction of repository to begin 2030 |
| Canada | DD | Underground repository laboratory established. Repository planned for use 2025 |
| Finland | DD | Five sites located for deep repository, one to be selected in 2010 for use by 2020 |
| France | R | Site selection studies underway for deep repository for commissioning 2020 |
| Germany | R | High-level repository to be operational after 2010 |
| India | R | Investigating deep repository sites |
| Japan | R | High-level waste storage facility under construction. Investigations for final repository site begun |
| Netherlands | R | High-level waste storage facility under construction. |
| Russia | R | Sites for final disposal under investigation |
| South Korea | Undecided | Low-level and intermediate-level waste site under investigation |
| Spain | DD | Final repository site selection program. Decision 2000, commissioning 2020. |
| Sweden | DD | Underground research laboratory for high-level waste. Site selection for repository, to begin disposal in 2008. |
| Switzerland | R | Central interim storage for all wastes under construction. Underground research laboratory for high-level waste repository, with final deep repository to be finished by 2020. |
| United Kingdom | R | High-level waste currently vitrified and stored, new underground repository planned. |
| USA | DD | Investigations on national final repository at Yucca Mountain, EIS published mid 1999, possible opening 2010. |

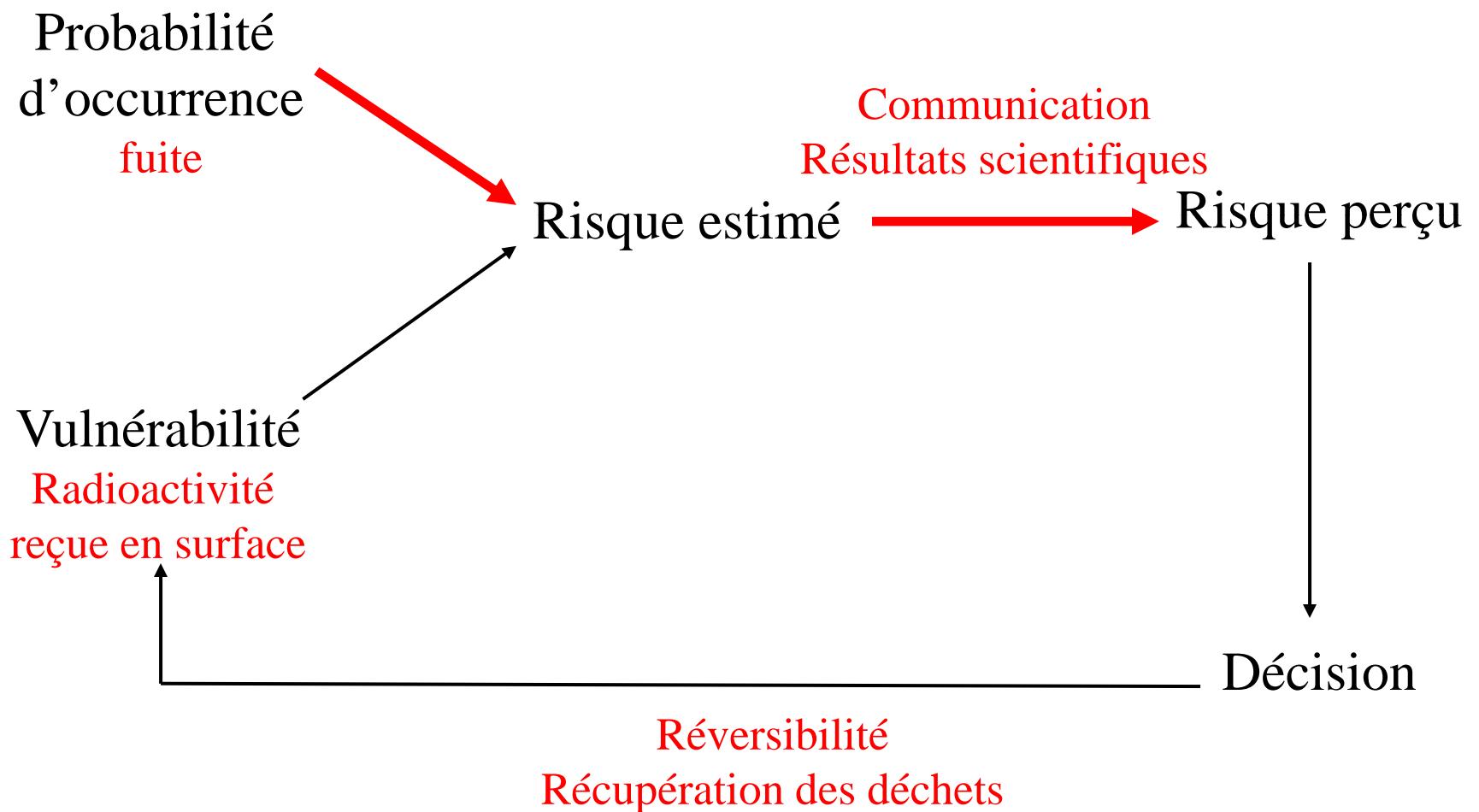
R : Reprocessing. DD : Direct Disposal

Les sites français

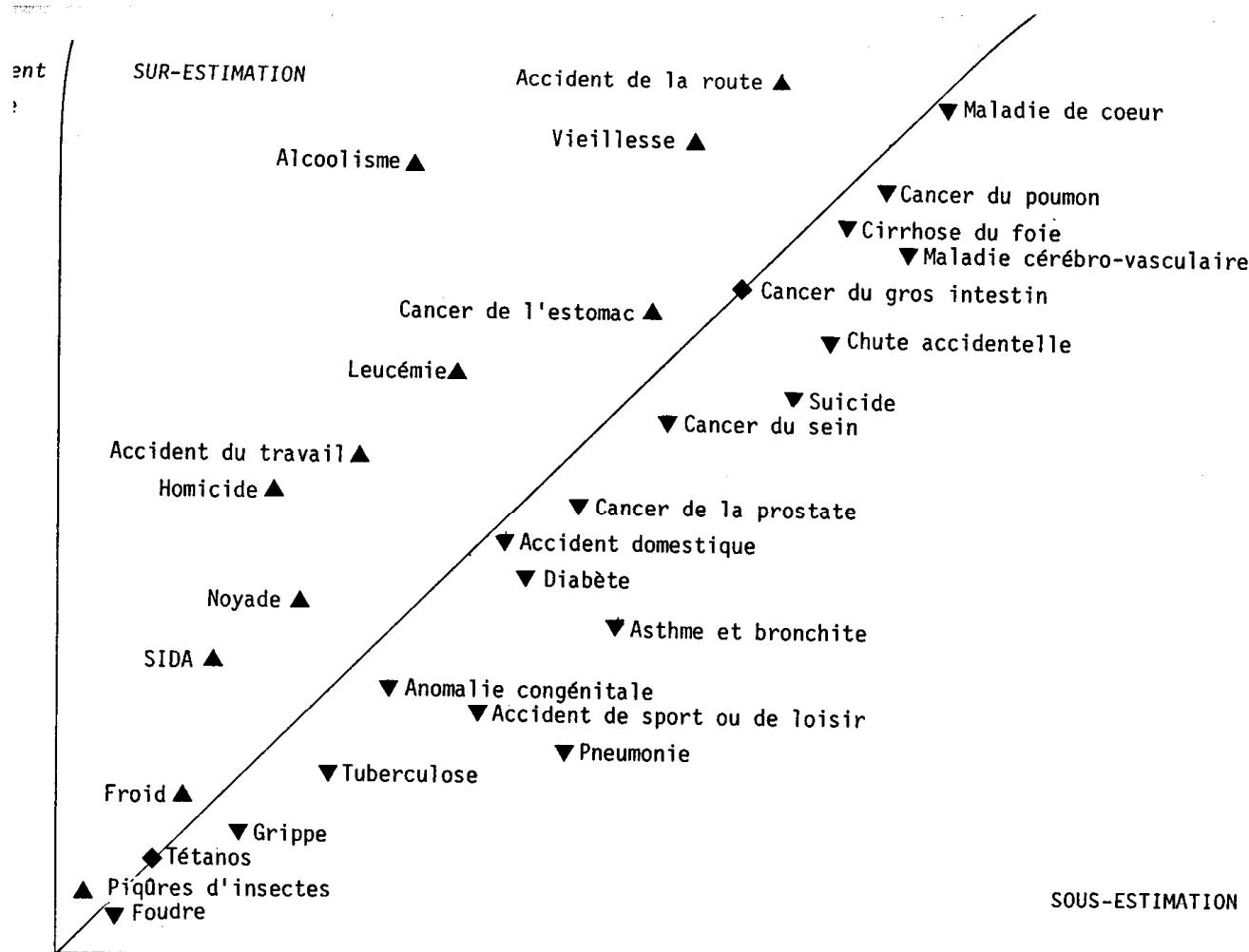




Le risque de stockage des déchets nucléaires



Perception des risques



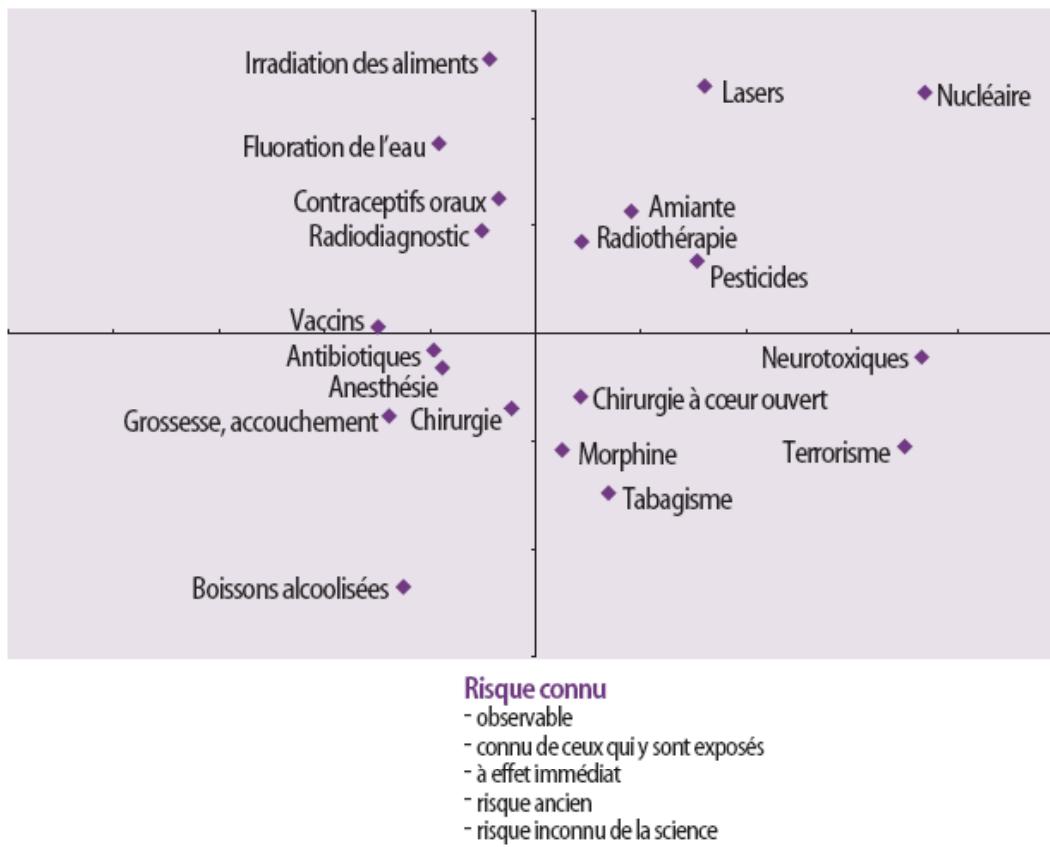
Classement réel (INSERM 1984)

Risque peu craint

- maîtrisable
- non craint
- n'implique pas de catastrophe planétaire
- conséquences non létales
- égal pour tous
- individuel
- faible risque pour les futures générations
- facile à réduire
- décroissant
- volontaire
- ne me concerne pas

Risque inconnu

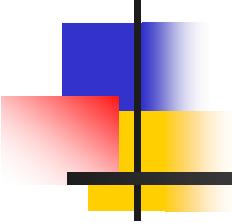
- pas observable
- inconnu de ceux qui y sont exposés
- à effet retard
- risque nouveau
- risque ignoré de la science



Risque fortement craint

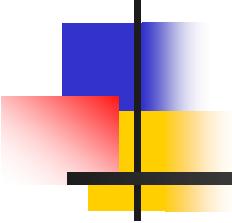
- non maîtrisable
- craint
- implique une catastrophe planétaire
- conséquences létales
- inégal
- catastrophique
- risque élevé pour les futures générations
- pas facile à réduire
- risque croissant
- involontaire
- me concerne

^a D'après : Slovic P, Fischhoff B, Lichtenstein S. Facts and fears : understanding perceived risk. In : Schwing RC, Albers WA Jr, editors. *Societal risk assessment : how safe is safe enough ?* New York : Plenum ; 1980. Positions de 20 dangers – au lieu des 90 initiaux – par rapport au facteur 1 (crainte) et au facteur 2 (risque inconnu) du graphique tridimensionnel déduit de la corrélation entre 18 caractéristiques du risque. Le facteur 3 (non indiqué ici) reflète le nombre de personnes exposées au danger et leur degré d'exposition personnelle.



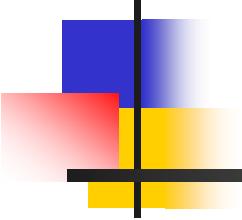
Le nucléaire au cœur de la politique énergétique française

| en Mtep | 1973 | 1980 | 1990 | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 |
|--|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Charbon | 17,3 | 13,1 | 7,7 | 3,5 | 3,3 | 2,3 | 1,5 |
| Pétrole | 2,2 | 2,4 | 3,5 | 2,2 | 2,0 | 1,9 | 1,9 |
| Gaz naturel | 6,3 | 6,3 | 2,5 | 1,8 | 1,7 | 1,5 | 1,5 |
| Électricité primaire | | | | | | | |
| - Nucléaire | 3,8 | 16,0 | 81,7 | 101,0 | 102,8 | 108,2 | 110,0 |
| - Hydraulique, éolien, photovoltaïque | 4,1 | 6,1 | 5,0 | 5,7 | 6,7 | 6,2 | 6,8 |
| Énergies renouvelables thermiques (*) | 9,8 | 8,7 | 11,4 | 11,8 | 12,0 | 11,8 | 11,9 |
| Total production primaire | 43,5 | 52,5 | 111,8 | 126,1 | 128,4 | 132,0 | 133,6 |
| Taux d'indépendance énergétique | 23,9% | 27,4% | 49,7% | 48,7% | 49,3% | 50,1% | 50,0% |



Organisation pour le stockage en France

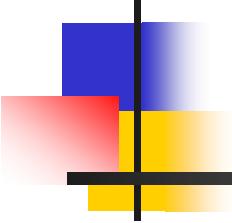
- Loi Bataille (1991)
 - 3 pistes: transmutation, entreposage, stockage géologique
 - Acceptation préliminaire des élus locaux
 - Études réalisées par l'ANDRA sous la surveillance d'une Commission Nationale d'Evaluation
 - Conclusions pour 2006
- Clis
- Rôle des chercheurs
 - Partenariat avec l'ANDRA (GDRs)
Programmes de recherche sur le site
 - Développement de la connaissance amont
programmes internes sur des questions « amont »
 - Expertise des chercheurs (participation à la CNE)



Communication et perception des déchets nucléaires

- Problèmes principaux en matière de dégradation de l'environnement
 - 41%: Pollution de l'air
 - 36%: Pollution de l'eau
 - 27%: Déchets radioactif
- Sujets à propos desquels on cache des choses à l'opinion publique
 - 47%: Déchets radioactifs
 - 43%: Risque d'accident de centrale nucléaire
 - 35%: Risque d'accident industriel
 - 18%: Effet de serre et changement climatique
- L'effort de recherche des pouvoirs publics français pour prendre en charge les déchets radioactifs insuffisant: 77%
- L'information doit être la plus transparente possible même si cela doit accroître les inquiétudes: 74%
- Le stockage est mal maîtrisé en France: 61%
- A terme la science va trouver un moyen pour neutraliser les risques liés aux déchets radioactifs: 64%

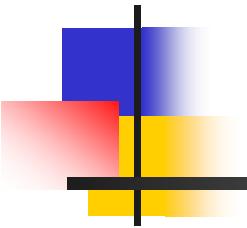
Étude du CREDOC 2004 auprès d'un échantillon
représentatif de 2009 personnes âgées de plus de 18 ans



Coût du stockage des déchets nucléaires

- France: 2.2 Milliards € sur la période 1991-2003 pour les 3 voies
- Site de Bure: 317 Millions € pour 2006-2010
- Provision pour le stockage: 71.4 Milliards d'euros (10% du coût de production)
- USA: Yucca Mountain \$ 7 Milliards depuis 1981





Calendrier dans le proche avenir

- **Mars 2005** : les députés Christian Bataille (PS) et Claude Birraux (UDF) rendent public un rapport sur l'avancement et les perspectives des recherches, pour le compte de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et techniques.
- **Juin 2005** : l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra) publie un premier rapport sur les résultats obtenus au laboratoire d'étude du stockage en profondeur de Bure (Meuse). Un second rapport est prévu fin 2005.
- **Automne 2005** : la Commission nationale du débat public (CNDP), autorité administrative indépendante, créée par la loi du 2 février 1995 relative à la protection de l'environnement, organise une consultation sur un Livre blanc proposé par les ministères de l'industrie et de l'environnement. Le réseau associatif "Sortir du nucléaire" prévoit un rassemblement à proximité du site de Bure (Meuse).
- **Début 2006** : le gouvernement présente un projet de loi sur la gestion des déchets radioactifs.