

## Histoire du nucléaire

## Les découvertes fondamentales (Pr. J. Foos)

Pierre et Marie Curie aux origines de l'énergie nucléaire

## La genèse de l'énergie nucléaire (1939-1945)

Le premier réacteur et la première bombe

## La maturité de l'énergie nucléaire (1945-1975)

Le développement industriel et les premières filières (suite)

## Heurts et malheurs de l'énergie nucléaire

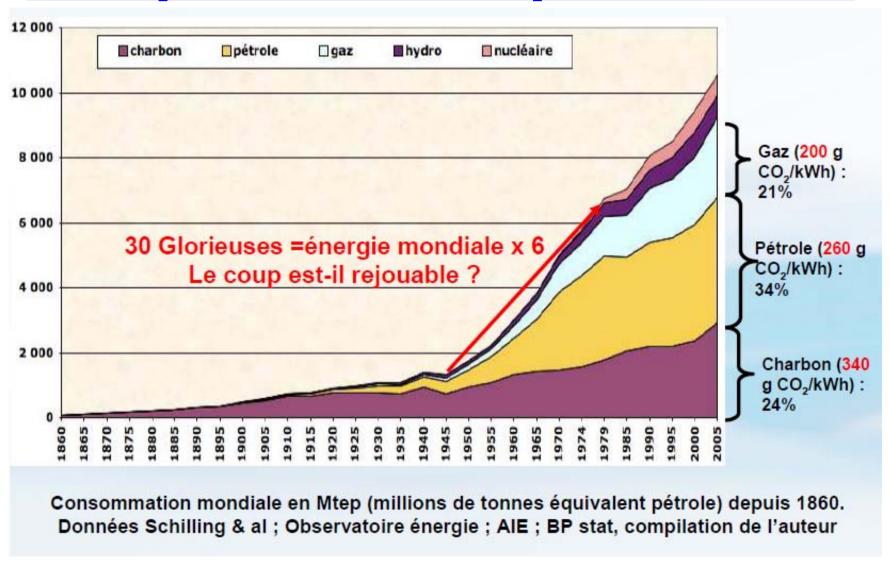
Radioprotection, accidents, et prolifération...

Les perspectives du nucléaire au XXI° siècle

# La montée des besoins : Réponse énergétique et développement durable

- ✓ **Besoins** énergétiques (conférence du Professeur Foos)
- ✓ Ouverture des **pays émergent** (El Baradei)
- ✓ Besoins en **combustible** : Uranium ou Plutonium

## Un défi pour l'avenir... sans réponse actuellement



#### M. ElBaradei : « On ne peut se passer du nucléaire »

Le Prix Nobel de la paix 2005 estime que l'avenir de l'atome n'est pas compromis par le drame de Fukushima

#### **Entretien**

irecteur de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) de 1997 à 2009, Prix Nobel de la paix en 2005, Mohamed ElBaradei devait intervenir à Paris, mercredi 28 septembre, dans le cadre d'un colloque sur l'énergie organisé par le cabinet KPMG. Il analyse pour Le Monde l'avenir de l'énergie nucléaire après l'accident de Fukushima.

#### Quels enseignements tirez-vous de l'accident de Eukuchima?

l'en tire deux : il va falloir améliorer la sûreté pour les 430 réacteurs en exploitation dans le monde, car on était plus laxiste il v a trente ans. et accélérer l'introduction des nouvelles technologies, qui sont bien plus sûres. Quitte à être parfois brutal et à ne pas hésiter à fermer les vieilles centrales, dont on ne peut pas améliorer la sûreté. Je suggère de commencer l'examen par celles de type RBMK [comme à Tchernobyl], qui n'ont pas d'enceinte de confinement, et les réacteurs de type Fukushima. Il faut aussi trouver un moyen d'inspecter les réacteurs militaires

#### Le nucléaire a-t-il toujours un avenir?

On ne peut pas se passer du nucléaire. Il fournit déjà 14% de l'électricité mondiale. Ét ce sera 24% en 2050, selon l'Agence internationale de l'énergie. Un milliard et demi d'êtres humains n'ont pas accès à l'électricité. Et sans cela, il n'y a pas de développement. Fukushima va-t-il néanmoins

#### ralentir son développement et accroître ses coûts?

Le nucléaire sera sans doute plus cher, en raison de l'usage des nouvelles technologies et du renforcement de la sûreté, mais je ne le vois pas ralentir beaucoup. Il y a actuellement soixante-cinq réacteurs en construction dans auinze pays. Je doute que la Chine et l'Inde renoncent à leurs projets.
Plusieurs Etats l'ont pourtant

fait: Allemagne, Suisse, Italie...

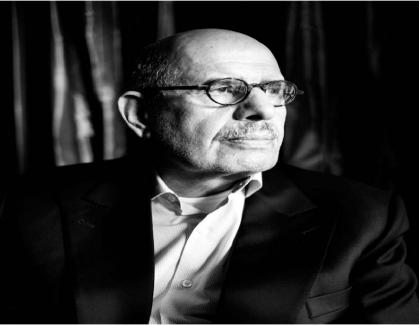
Oui, mais prenez la Suède, qui avait programmé la sortie du nucléaire en 1980 : elle avait alors douze réacteurs; elle en exploite onze aujourd'hui. Le nucléaire donne une certaine indépendance énergétique, comme en France. Si vous en sortez, vous dépendez du charbon, du pétrole et du gaz, dont les prix augmentent fortement. Et comment, alors, lutter contre le réchauffement climatique?

Le nucléaire est une partie de la solution. Les énergies renouvelables ne neuvent assurer une production de base. Soyons réalistes : pour les cinquante prochaines années, on aura besoin du nucléaire. Des paysà forte population, comme l'Indonésie et le Vietnam, sont sur les rangs. La Turquie vient de confirmer des projets. Et d'autres s'ajouteront à la liste.

#### Quel type de régulation serait souhaitable, et en s'appuyant sur quels standards?

Les standards de l'AIEA sont un ooint de référence. Et vous pouvez y aiouter des standards nationaux complémentaires. Les audits des centrales doivent être obligatoires. Ils ne le sont pas aujourd'hui, et c'est un défaut majeur dans le système de sûreté international. Si un oays veut utiliser l'énergie nucléaire, il doit les accepter. Car si un accident se produit, il a des conséquences mondiales

Le temps des audits effectués par des experts internationaux indépendants est venu. Après Tcherno-byl ou Fukushima, les pays ne peuvent plus se retrancher derrière l'argument selon lequel la sûreté relèverait de la souveraineté nationale. Dans notre cadre mondialisé, ce concept de souveraineté a évolué. Un exemple : les pandémies, contre esquelles un pays ne peut pas lutter seul. Un pays ayant opté pour le nucléaire doit accepter que ses voisins et le reste du monde lui demandent si ses réacteurs sont



Mohamed ElBaradei à Paris, le 27 septembre. JULIEN DANIEL/MYOP POUR «LE MONDE»

#### Comment inciter les gouverne ments à emprunter cette voie?

La pression de l'opinion est importante car les gouvernements sont des «animaux» qui bougent lentement. Il faut que certains pays lancent le mouvement, en accep-

tant des audits obligatoires effectués par des experts étrangers, dans un cadre défini internationalement. Plus ils seront nombreux, et n'ont pas souscrit au protocole sera forte. Par ailleurs, il faut aller vers

une mutualisation internationale des expertises. A cet égard, la mise en place d'une «force d'action rapi de multinationale», proposée pai Nicolas Sarkozy, est une bonne idée La transparence vous sem-ble-t-elle suffisante?

Non! Les acteurs du nucléaire, gouvernements et opérateurs, doivent être plus transparents, ce qui n'est pas dans leur culture. Cette source d'énergie doit faire l'objet d'un débat public. Les gens ont le droit d'avoir des explications. même si cela perturbe l'approche élitiste de l'industrie nucléaire.

La transparence est la clé pour faire accepter le nucléaire à l'opi nion. Elle doit porter sur la sûreté, mais aussi sur les coûts réels. depuis la construction jusqu'au démantèlement, si vous voulez une véritable compétition dans le secteur de l'énergie. Cette absence de transparence a été notable au Japon.

#### « La transparence est la clé pour faire accepter le nucléaire à l'opinion. Elle doit porter sur la sûreté et les coûts réels »

Il faut aussi régler le problème du stockage des déchets ultimes. A mon sens, il faudrait disposer de deux ou trois pays pour les entreposer, pas davantage. La Russie pourrait être l'un de ceux-ci. Cette activité pourrait être très rentable. Quel rôle les autorités nationa-

#### les de sûreté doivent-elles

Elles doivent d'abord être indé-

pendantes, comme c'est le cas en France ou aux Etats-Unis, pour pouvoir dire clairement à quel moment un réacteur doit être arrê té. C'est d'autant plus important que la durée d'exploitation des réacteurs est actuellement prolongée. La trop grande proximité entre régulateurs et opérateurs a été l'une des sources du problème à Fukushima.

#### Ce qui suppose que ces régulateurs aient des movens

Il faut, c'est vrai, leur donner de vrais moyens, qu'ils soient natio naux ou internationaux. La tech nologie nucléaire est très sophistiquée, et donc complexe à surveiller. Malheureusement, les gouvernements ne réagissent le plus souvent qu'à la suite de chocs. Il a fallu Tchernobyl pour qu'on met-te en place un système plus encadré de sûreté. Puis le 11-Septembre pour qu'on se préoccupe du ris-que terroriste. Le budget de l'AIEA [environ 320 millions d'euros] est ridi cule par rapport à ces enjeux. Il faudrait au moins le doubler.

PROPOS RECUEILLIS PAR JEAN-MICHEL BEZAT ET BERTRAND D'ARMAGNAC

#### De la scène internationale à l'élection présidentielle en Egypte?

A 69 ANS, MOHAMED ELBARADEI s'ouvre de nouveaux horizons sans renoncer à ses engagements passés. Directeur de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) de 1997 à 2009, lauréat 2005 du prix Nobel de la paix avec son agence, ce juriste formé au Caire et à New York s'est enga gé dans le processus de transition démocratique en Egypte avant le renversement du président Hosni Moubarak, le 11 février.

Sera-t-il candidat à l'élection orésidentielle égyptienne, dont la date n'est toujours pas arrêtée? C'est probable, même s'il ne veut pas devenir le *« bouc émissaire »* d'une révolution qui accoucherait d'un régime ne respectant ni les principes démocratiques ni les lroits de l'homme. M. ElBaradei a laissé un souve-

nir fort de ses trois mandats à la tête de l'AIEA, chargée, depuis 1957, d'inspecter les installations nucléai-

res civiles et de promouvoir l'utilisation pacifique de l'atome : celui d'un haut fonctionnaire qui, quelques jours avant l'invasion américaine de l'Irak, en mars 2003, ruinera-preuve à l'appui-la thèse américaine qui voulait que le régime de Saddam Hussein détienne des armes de destruction massive. Ce iour-là, cet homme élégant et courtois a fait son entrée dans le cercle des « politiques » influents au niveau international

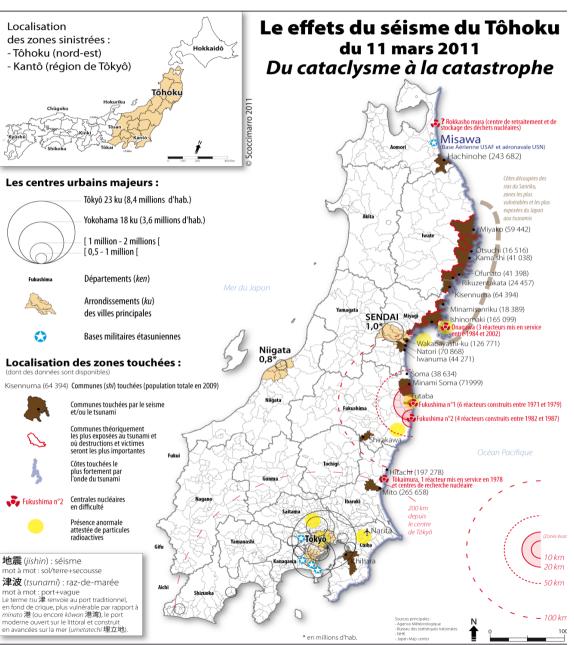
L'administration Bush lui vouera dès lors une haine tenace et fera tout, en 2005, pour lui barrer la voie d'un troisième mandat à l'AIEA. D'autant que M. ElBaradei commençait alors à afficher, selon Washington, une complai sance coupable à l'égard du programme nucléaire iranien. Jus-qu'au bout, Mohamed ElBaradei s'opposera à l'emploi de la force contre l'Irak, l'Iran et la Corée du Nord – le meilleur moven, selon

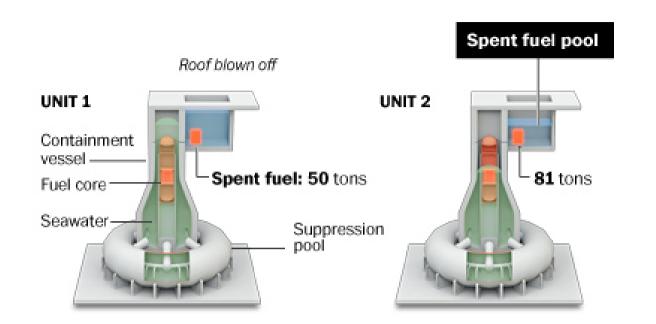
lui, de pousser ces pays à se doter de l'arme nucléaire. Hostile à toute prolifération militaire, il défend l'accès des

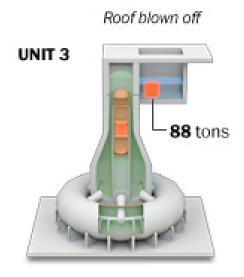
pays en développement à un programme nucléaire, facteur, selon lui, de développement économique. Il prend pour exemple l'Indo nésie, le Vietnam et la Turquie, sans oublier l'Egypte, qui, nuance-t-il, a « des problèmes plus urgents à réaler». 🗉

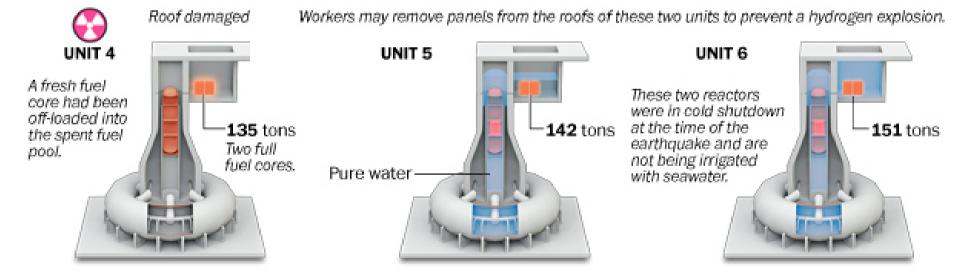
#### La montée des risques : accidentologie et environnement

- ✓ Augmentation de la puissance, donc des conséquences
- ✓ Accident thermohydraulique : <u>Three Miles Island</u> (ppt)
- ✓ Accident neutronique : Tchernobyl
- ✓ Accident combustibles : <u>Fukushima</u> (développement)
- ✓ Vers une société nucléarisée...
- ✓ Conséquences sur l'environnement









#### Centrale de Fukushima-Daiichi: les points critiques



#### Réacteur 1

70 % du cœur est endommagé et il est partiellement dénoyé. L'enceinte de confinement est intègre

#### Réacteur 2

33 % du cœur est endommagé mais il est sous eau. L'enceinte de confinement est également endommagée mais semble étanche. La connexion électrique est rétablie mais les systèmes de refroidissement ne sont pas remis en marche

#### Réacteur 3

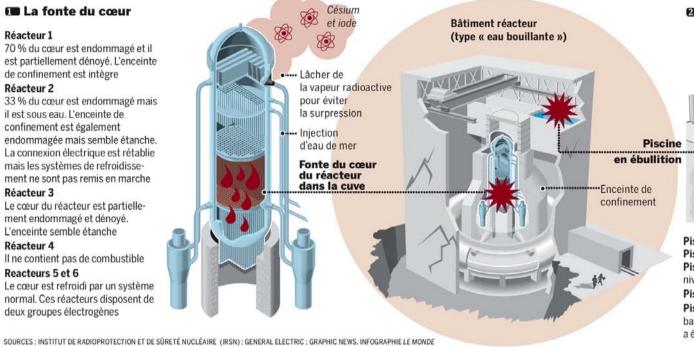
Le cœur du réacteur est partiellement endommagé et dénoyé. L'enceinte semble étanche

#### Réacteur 4

Il ne contient pas de combustible

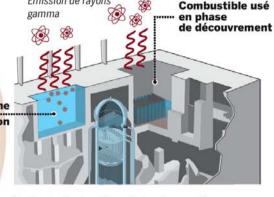
#### Reacteurs 5 et 6

Le cœur est refroidi par un système normal. Ces réacteurs disposent de deux groupes électrogènes



#### Evaporation des piscines de combustible

Emission de rayons



Piscine du réacteur 1 : une fuite est suspectée Piscine du réacteur 2 : l'eau est en ébullition

Piscine du réacteur 3 : suspicion de perte d'étanchéité. Le

niveau d'eau est très bas. Ebullition suspectée

Piscine du réacteur 4 : ébullition stoppée par un apport d'eau Piscines des réacteurs 5 et 6 : la température de l'eau est en baisse ou stable. Le niveau d'eau est contrôlé. Le toit du bâtiment a été percé pour éviter une combustion d'hydrogène

# Quatre problèmes:

- Arrêt des réacteurs (OK)
- Gestion des cœurs (plus de refroidissement)
- Gestion de la vapeur (risque hydrogène)
- Gestion des combustibles en piscine

#### L'état de la centrale le lundi 28 mars

#### N° 1 - Etat critique. Cœur partiellement endommagé.

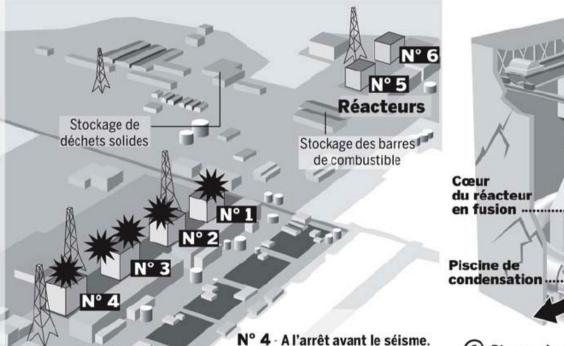
L'exploitant a cessé d'injecter de l'eau de mer, celle-ci ayant été remplacée par de l'eau douce. Présence massive de sel dans le réacteur fragilisant la pérennité du refroidissement. De l'eau fortement contaminée a été découverte dans la salle des machines.

#### N° 2 - Etat critique. Cœur partiellement en fusion.

L'exploitant a cessé d'injecter de l'eau de mer, celle-ci ayant été remplacée par de l'eau douce. Doutes sur l'étanchéité de la cuve. Niveau de radiation trop fort pour permettre le travail des employés sur place. De l'eau fortement contaminée a été découverte dans la salle des machines.

## N° 3 - Etat critique. Le cœur a partiellement fondu.

D'importantes fumées se sont échappées le 23 mars de l'installation, laissant penser que la cuve n'est plus intègre et que le cœur en fusion du réacteur a déjà attaqué le béton sous-jacent. De l'eau fortement contaminée a été découverte dans la salle des machines.



Système de refroidissement

inondé lors du tsunami

Partie supérieure du bâtiment

découvrement du combustible usé.

endommagée. Risque de

De l'eau a été découverte

dans la salle des machines.

Nºs 5 et 6 - Réacteurs à l'arrêt avant le séisme.

Stabilisation de la température dans les piscines. Percement des toitures pour diminuer le risque d'explosion d'hydrogène.

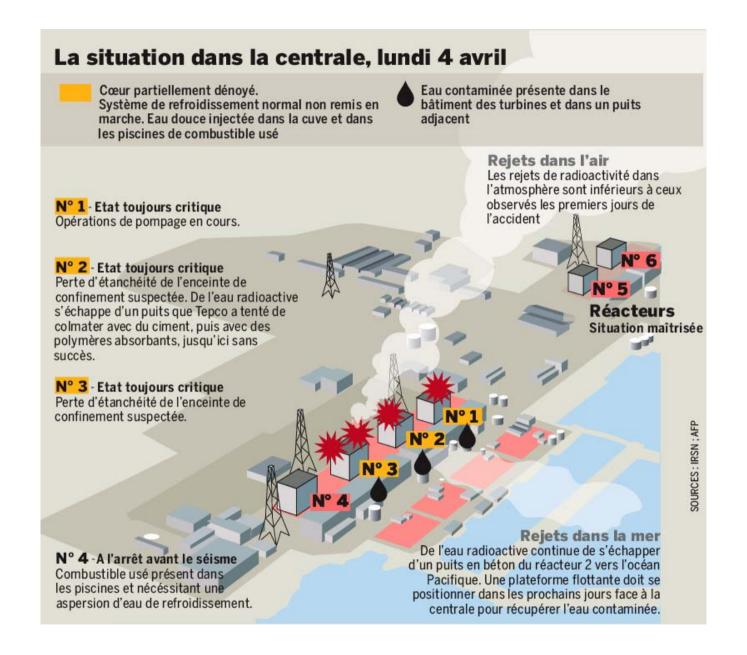
# Cœur du réacteur en fusion ......2

Piscine de

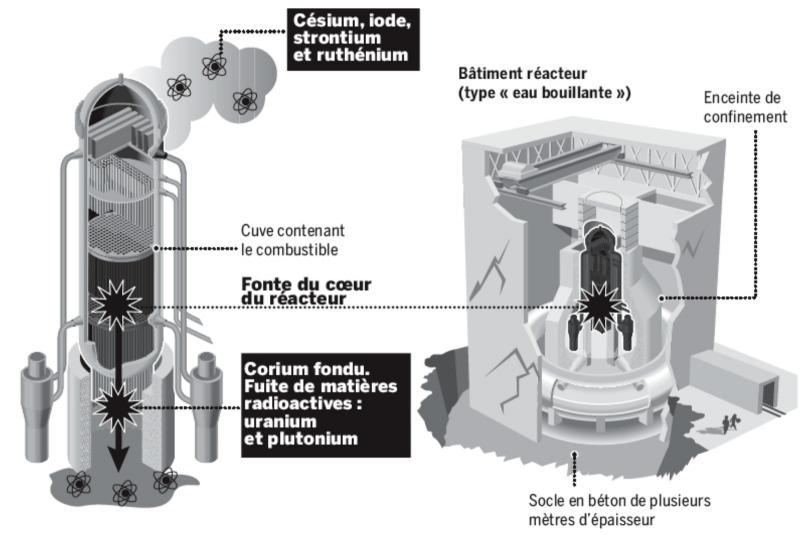
combustible usé

- 1 Risques de percement du socle en béton « radier »
- Risques de coulée du cœur sur la piscine de condensation

à l'échelle



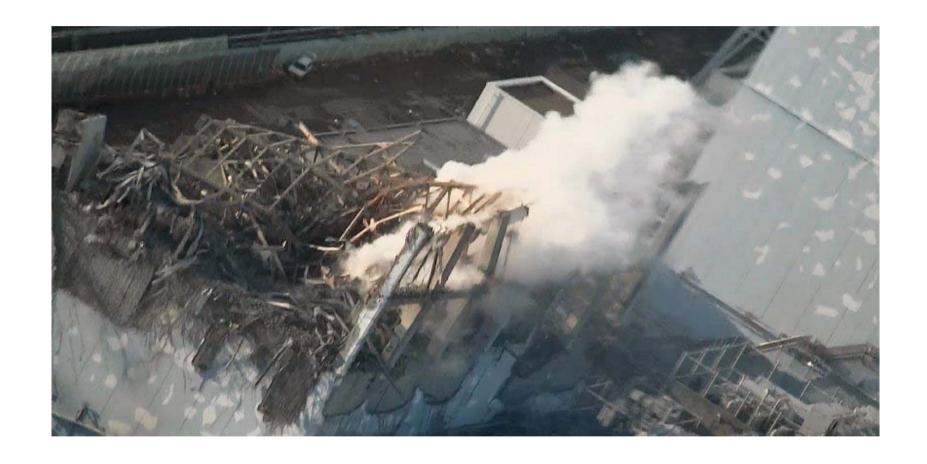
#### Le scénario de fusion du cœur



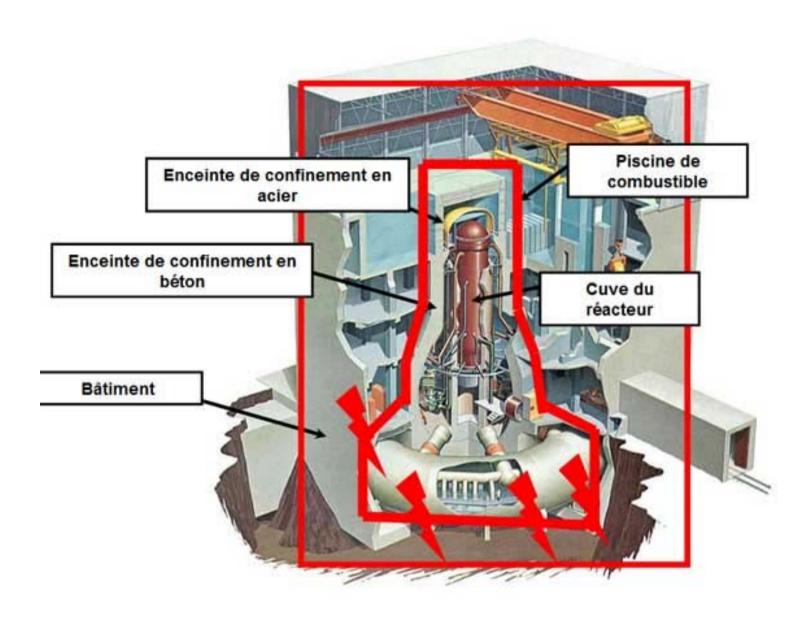
SOURCES : INSTITUT DE RADIOPROTECTION ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE (IRSN) ; GENERAL ELECTRIC ; GRAPHIC NEWS.

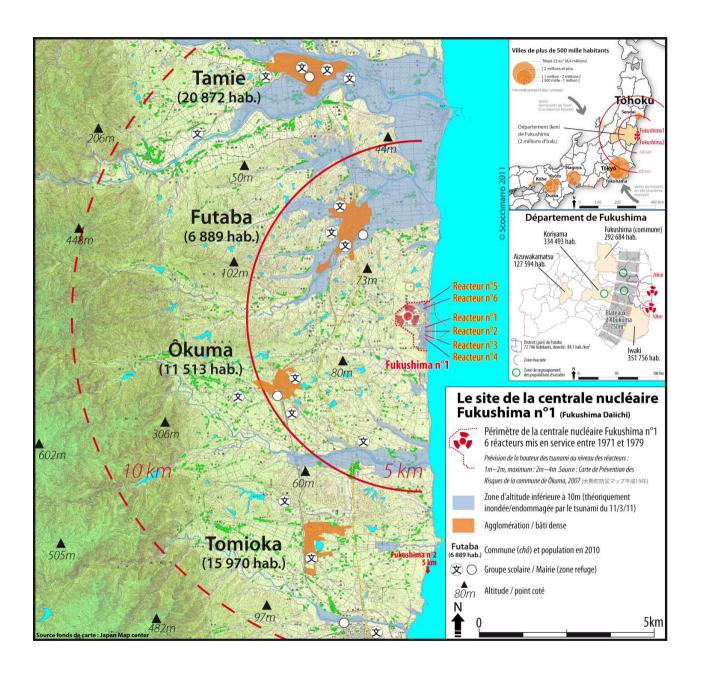
INFOGRAPHIE LE MONDE

# Le scénario maximal: fusion du cœur



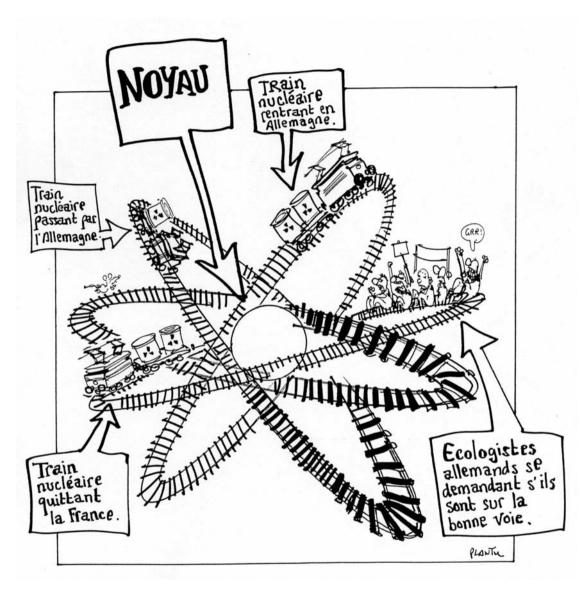
Explosions hydrogène, dispersion, 3° barrière



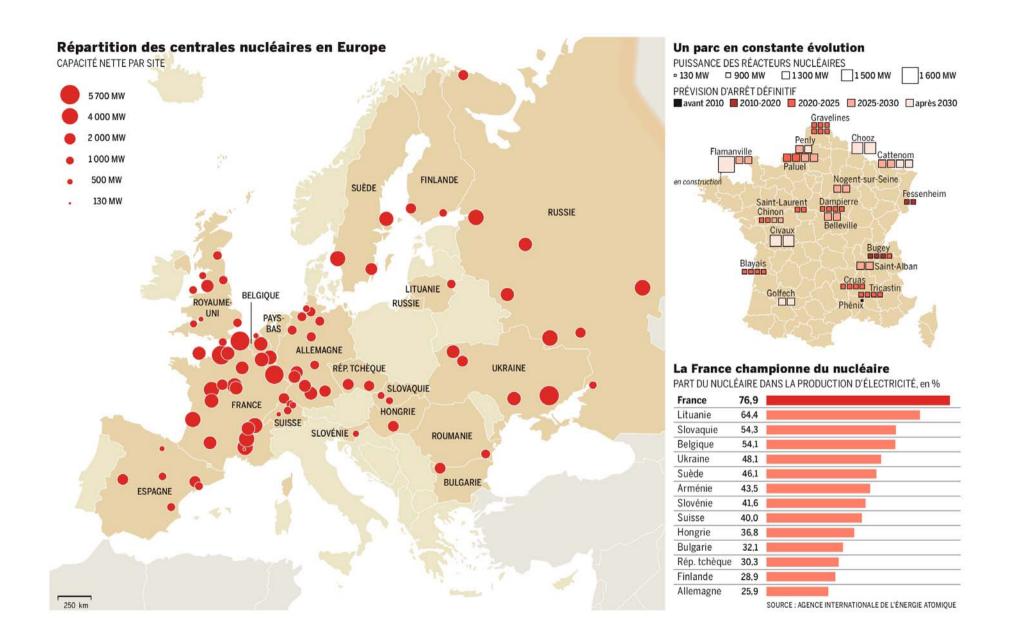


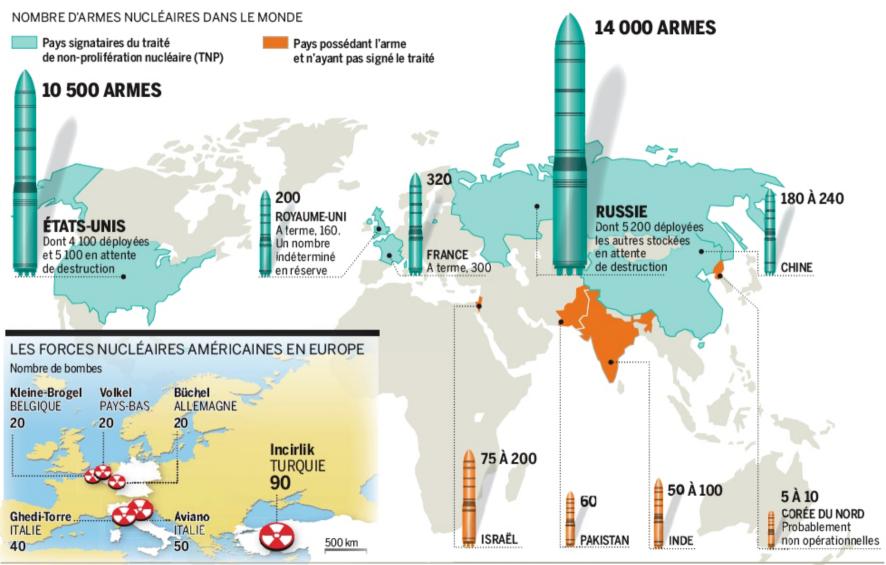
## Descente de la confiance des populations, donc des élus

- ✓ Opposition au nucléaire structurée
- ✓ Parlements transnationaux : délocalisation des décideurs
- ✓ Redistributions stratégique et économiques
- ✓ Nucléaire et militaire : confusion et craintes
- ✓ Retour à la démocratie participative : débats publics



Internationalisation des mouvements d'opinion



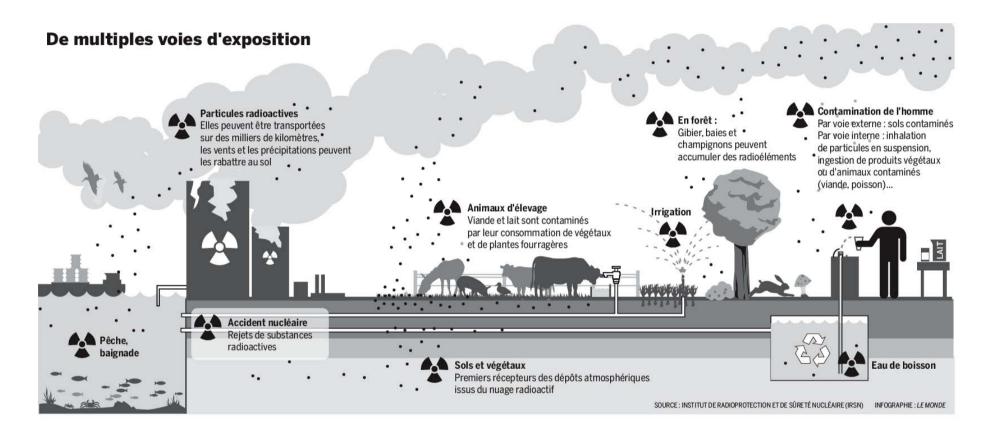


SOURCES: UNION OF CONCERNED SCIENTISTS, ARMS CONTROL ASSOCIATION, INTERNATIONAL PANEL ON FISSILE MATERIALS (ESTIMATIONS)

## Les points chauds et les risques



#### Possibilités de contamination environnementales



# Etudes prospectives et suivi des installations Laboratoires et commissions d'experts

## Réponses institutionnelles

- ✓ Nationales : débats, lois, et commissions parlementaires
- ✓ Internationales : AIEA, prolifération et soutiens techniques
- ✓ Techniques : EPR (génération III) et projets Génération IV

## Démocratie locale : les CLIs

- Suite à la circulaire du 1<sup>er</sup> Ministre du Président François MITTERRAND, P. MAUROY en date du 15 décembre 1981, possibilité de création des Commissions locales d'information par les Conseils généraux dans les départements où sont construits de grands équipements nucléaires.
- ■Dans la Manche création de la CLI de Flamanville (CSPI) en 1985 par le Président du Conseil général de l'époque : JOZEAU-MARIGNE. Le Président du Conseil général préside de droit la commission ou bien il délègue cette mission à un autre élu, aujourd'hui : Michel LAURENT Vice-président du Conseil général en charge de l'énergie.

Ce rapport 2008 est établi au titre de l'article 21 de la loi n°2006-686 du 13 juin 2006 relative à la transparence et à la sécurité en matière nucléaire.

#### L'article 21 précise que :

Tout exploitant d'une installation nucléaire de base établit chaque année un rapport qui expose

- les dispositions prises en matière de sûreté nucléaire et de radioprotection ;
- les incidents et accidents en matière de sûreté nucléaire et de radioprotection, soumis à obligation de déclaration en application de l'article 54, survenus dans le périmètre de l'installation, ainsi que les mesures prises pour en limiter le développement et les conséquences sur la santé des personnes et l'environnement;
- la nature et les résultats des mesures des rejets radioactifs et non radioactifs de l'installation dans l'environnement ;
- la nature et la quantité de déchets radioactifs entreposés sur le site de l'installation, ainsi que les mesures prises pour en limiter le volume et les effets sur la santé et sur l'environnement, en particulier sur les sols et les eaux.

Ce rapport est soumis au comité d'hygiène, de sécurité et des conditions de travail de l'installation nucléaire de base, qui peut formuler des recommandations. Celles-ci sont annexées au document aux fins de publication et de transmission. Les principaux thèmes développés dans ce rapport concernent la sûreté, la radioprotection et l'environnement, thèmes qui correspondent aux définitions suivantes :

Selon l'article 1er de la loi n°2006-686 :

La sureté nucléaire est l'ensemble des dispositions techniques et des mesures d'organisation relatives à la conception, à la construction, au fonctionnement,

à l'arrêt et au démantèlement des installations nucléaires de base, ainsi

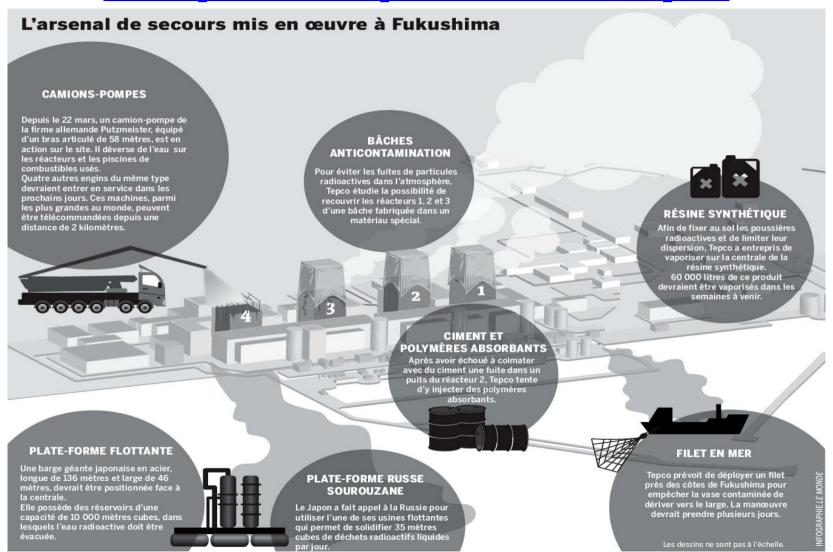
qu'au transport des substances radioactives, prises en vue de prévenir les accidents ou d'en limiter les effets.

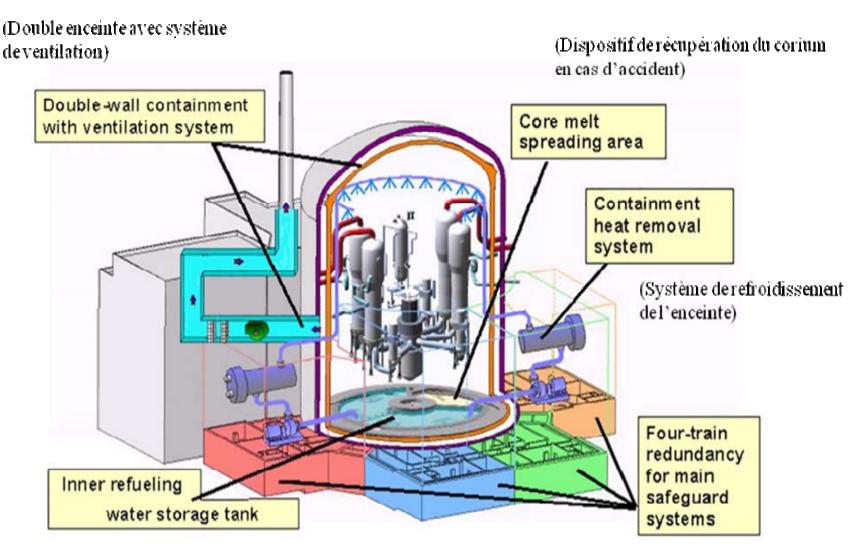
La radioprotection est la protection contre les rayonnements ionisants, c'est-à-dire l'ensemble des règles, des procédures et des moyens de prévention et de surveillance visant à empêcher ou à réduire les effets nocifs des rayonnements ionisants produits sur les personnes, directement ou indirectement, y compris par les atteintes apportées à l'environnement ».

L'environnement, est défini par référence à l'article L.110-1 du code de l'environnement, aux termes duquel : « les espaces, ressources et milieux naturels, les sites et paysages, la qualité de l'air, les espèces animales et végétales, la diversité et les équilibres biologiques auxquels ils participent font partie du patrimoine commun de la nation ».

Un centre nucléaire de production d'électricité (CNPE), est une installation industrielle intégrée

## Exemples de coopérations techniques

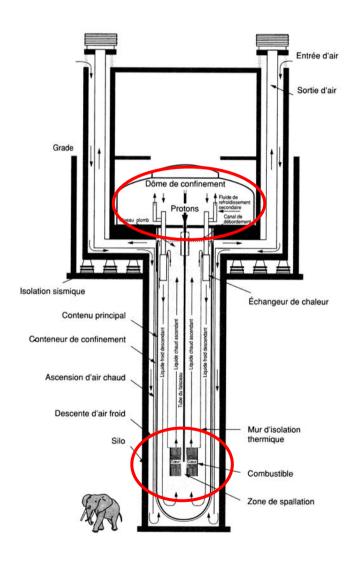




(Réservoir d'eau interne au bâtiment réacteur)

(Quatre zones in dépendantes pour les principaux systèmes de sauvegarde)

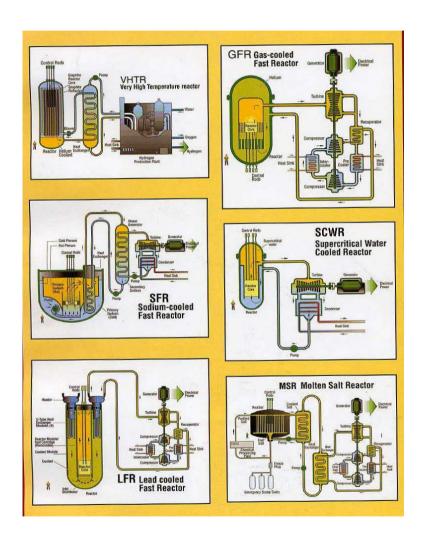
## Transmutation des déchets: l'option Rubia



Cœur de l'amplificateur d'énergie proposé par Carlo Rubbia et ses collaborateurs (l'éléphant ajouté par Georges Charpak donne l'échelle). Sur le même site, on aurait l'accélérateur de protons et la salle des machines, voire les usines de fabrication de combustible et de retraitement.

Ce concept spallation-fission pourrait aussi s'avérer intéressant pour la transmutation de déchets nucléaires.

# Forum GENERATION IV: internationalisation



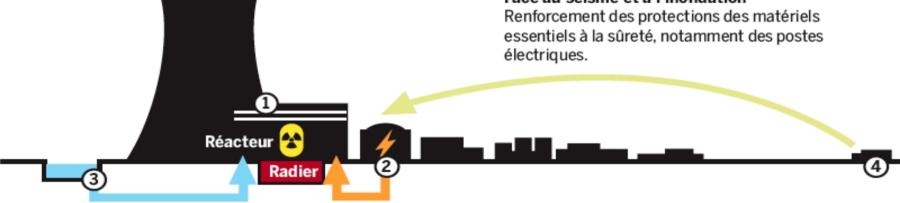
#### Les propositions d'EDF pour mieux répondre en cas de crise

1 Face à la fusion du cœur

Renforcement du plancher (radier) du bâtiment (demandé à Fessenheim 1 par l'Autorité de sûreté nucléaire). Renforcement des filtres U5 à sable qui captent l'essentiel de la radioactivité en cas de dépressurisation.

2 Face à la perte d'alimentation électrique Mise en place d'un groupe diesel d'« ultime secours ».

#### Face au séisme et à l'inondation



(3) Face à la perte d'eau de refroidissement

Raccordement du circuit primaire, des générateurs de vapeur et des piscines d'entreposage des combustibles usés à un « appoint ultime en eau » par forage ou dérivation des bassins actuellement destinés au refroidissement du circuit secondaire.

4 Pour la gestion de crise

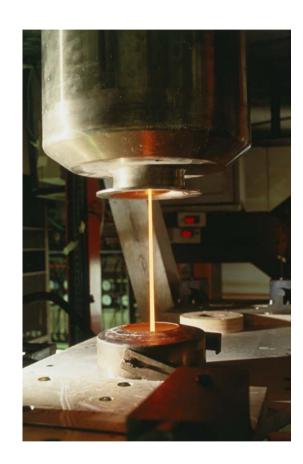
Mise sur pied d'une force d'action rapide nucléaire au niveau national, mobilisable en 24 heures et dotée de moyens électriques autonomes, capable de prendre le relais des équipes locales;

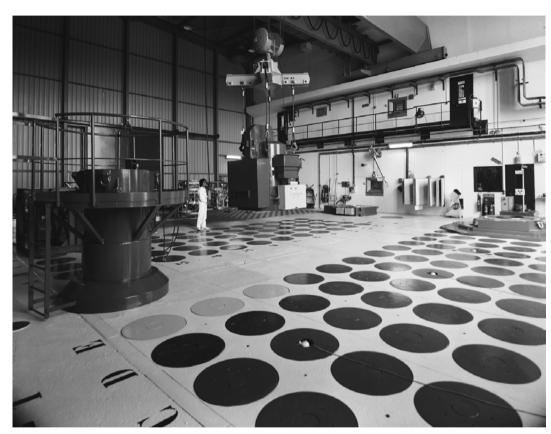
Construction à proximité de la centrale d'un poste de crise avancé mobilisable en urgence, doublé d'une base arrière.

## Complexité du problème

- ✓ **Démantèlement** et déconstruction
- ✓ Gestion des déchets
- ✓ Radioprotection, législation du travail décontamination
- ✓ Évolution de la **législation du travail** (Europe, CIPR)
- √ études épidémiologiques

## Gestion des déchets : nouvelles techniques





Objectifs à très long terme...

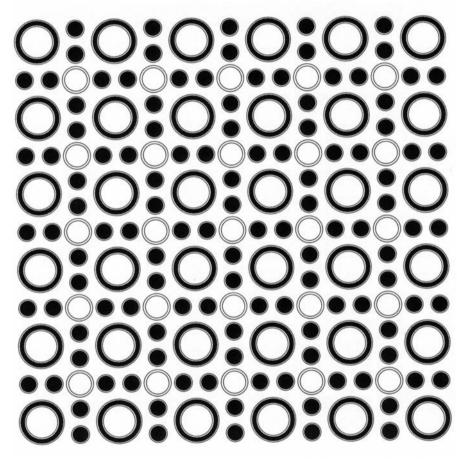
# La loi du 30 décembre 1991 prolongée par celle du 28 juin 2006

- 1. Étude d'un stockage à grande profondeur
- 2. Étude d'un entreposage en surface ou à faible profondeur
- 3. Étude des possibilités de transmutation des déchets

Chaîne blindée et boîte à gants dans Atalante à Marcoule : cette installation est utilisée pour les études de séparation poussée des actinides avant transmutation



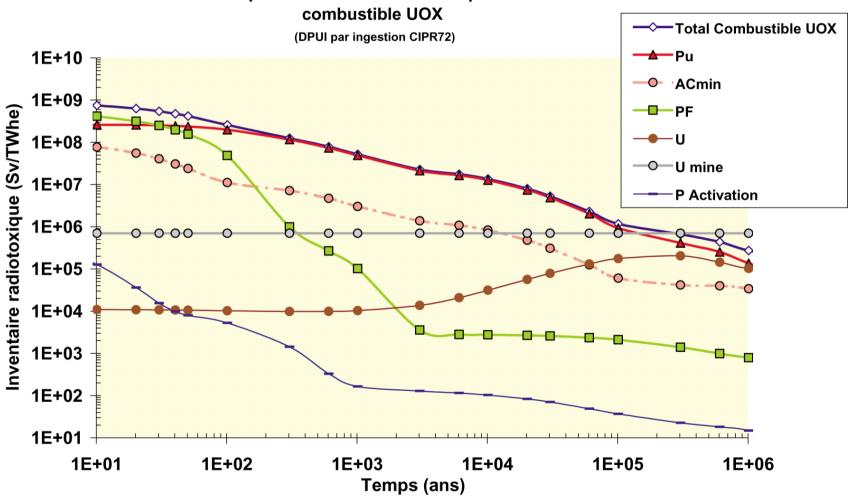
## Gestion du Plutonium et des actinides (APA)



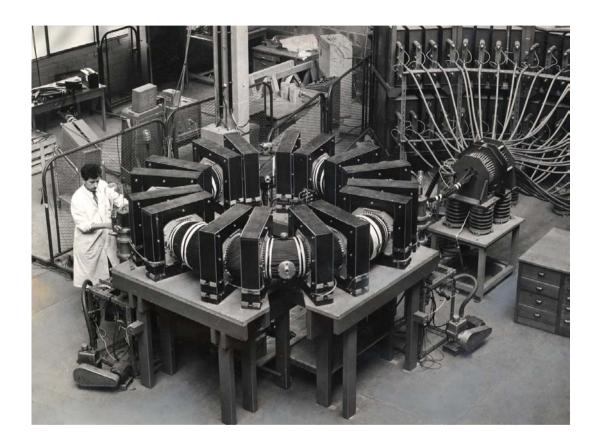
Projets de combustibles

## Problématique des stockages





## Et la fusion : rêve d'avenir ou illusion ?



Tokamak de Fontenay aux Roses 1960-1990

# Torre Supra et le confinement magnétique



## Cadarache et la fusion : le projet ITER

Nécessité de contributions internationales : coût élevé

Spécificité des matériaux?

Risques radiologiques?

Combustibles?

Un nouveau défi...