

# Introduction Générale sur l'Énergie Nucléaire



**CNSTN**

National Centre for Nuclear Sciences and Technology

Walid DRIDI Eng. PhD.

National Center for Nuclear Sciences and Technologies



## PLAN DE CHAPITRE

1. Introduction
2. Demande d'énergie dans le monde
3. Les origines du nucléaire civil actuel
4. Le fonctionnement d'un réacteur nucléaire à eau pressurisée
5. Le combustible et son cycle
6. Les déchets radioactifs et leur gestion actuelle
7. Le déclassé et le démantèlement des installations nucléaires
8. Sécurité et sûreté nucléaire
9. Le nucléaire dans le monde : les centrales et les réacteurs de recherches
10. Le nucléaire en Tunisie

## Introduction

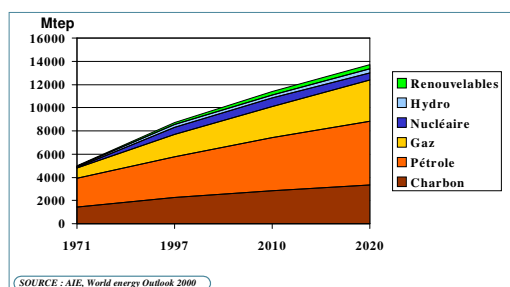
Après un départ fulgurant au cours des années 1950, où elle représentait pour beaucoup l'espoir d'une source d'énergie inépuisable et à coût compétitif, l'énergie nucléaire a connu, dans les années 80-90, un rejet de la part d'une majorité de l'opinion publique dans plusieurs pays, en Amérique du Nord et en Europe Occidentale, suivi d'un brutal coup d'arrêt de son développement.

Les raisons de cette pause sont certainement multiples et s'expliquent en partie par les accidents de Three Mile Island (USA) en 1979 et de Tchernobyl (Ukraine) en 1986 qui eurent un fort impact sur les opinions publiques. Par ailleurs, les mouvements écologistes et les partis Verts firent de la contestation de l'énergie nucléaire un des thèmes principaux de leurs programmes, fortement relayée par la presse.

## Demande d'énergie dans le monde

La **tonne d'équivalent pétrole** (symbole **tep**) est une unité de mesure de l'énergie. Elle est notamment utilisée dans l'industrie et l'économie. Elle vaut, selon les conventions, à 42 GJ.

### Vers un développement énergétique durable



Une production mondiale d'énergie à 87% d'origine fossile !

## Demande d'énergie

L'énergie nucléaire a beaucoup d'atouts pour être une réponse énergétique satisfaisante, **sa place dans un 'mix' énergétique**.

À cela **deux conditions** :

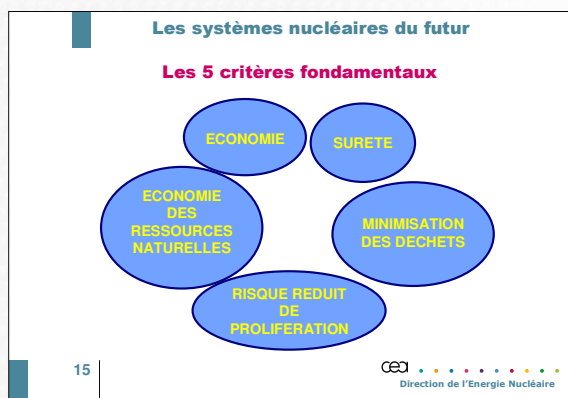
- 1- répondre aux préoccupations de l'opinion publique.
- 2- proposer de nouveaux systèmes nucléaires, plus performants encore en termes de sûreté ou d'économie, mais, surtout, qui placeront en première priorité les critères de **développement durable** et de non-prolifération.

Le nucléaire acceptable: c'est avant tout le **démontrer 'par la preuve'**.

- 1- le fonctionnement exemplaire des réacteurs nucléaires depuis plus de 25 ans,
- 2- Les taux de disponibilité sont excellents, les incidents, même mineurs, diminuent...

La **gestion des déchets** est apparue ces dernières années comme le problème majeur du nucléaire pour l'opinion publique. Il explique probablement à lui seul une partie de la défiance à l'égard du nucléaire

## Les critères fondamentaux de conception des réacteurs



## Les origines du nucléaire civil actuel

- En décembre 1953, en pleine guerre froide, le discours "Atoms for Peace" du président américain Eisenhower devant les Nations unies: rôle de l'énergie nucléaire.
- L'année suivante marque en Russie le début de la production commerciale d'électricité d'origine nucléaire.
- Ces initiatives ont influencé les politiques énergétiques, durant ces 50 années, l'énergie nucléaire s'est largement développée à travers le monde : 441 réacteurs en opération fin 2003, représentant environ 360 GWe dans +30 pays.
- La part du nucléaire dans la production d'électricité est de 16 % (30 % dans les pays de l'OCDE), ce qui représente également 7 % de l'énergie primaire.

**La première génération de réacteurs** : les premiers prototypes aux États-Unis, en Russie, en France et en Grande-Bretagne. Cette première génération, développée dans les années 1950-1960, en uranium naturel.

**La Génération II de réacteurs** entre 1970 à 1990 et qui correspond à la majorité du parc aujourd'hui en exploitation dans le monde.

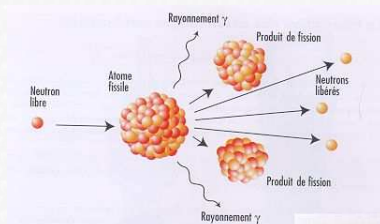
## Le fonctionnement d'un réacteur nucléaire à eau pressurisée

- Un réacteur à eau pressurisée : un dispositif destiné à chauffer de l'eau, avec à l'intérieur de la chaudière une pression de 150 bars et une température de 300 °C.
- Le principe de réacteur : entretenir des **réactions de fission** de noyaux d'uranium ou de plutonium au sein d'un milieu, appelé **cœur du réacteur**.
- Chaque fission, induite par les neutrons présents dans le cœur, dégage une énergie de l'ordre de 200 MeV, et produit 2 à 3 neutrons supplémentaires, dont l'un sert à entretenir la réaction en chaîne, les autres étant absorbés dans (l'eau ou) les structures ou perdus hors du cœur.
- Un réacteur à eau pressurisée : des réacteurs, dits à **neutrons thermiques**, c'est à dire que les neutrons de grande énergie (4,8 MeV) issus de la fission sont ralentis par chocs successifs dans un milieu que l'on appelle **modérateur**, pour atteindre l'équilibre thermique avec ce milieu.
- À l'énergie thermique (de l'ordre de 0,025 eV): la probabilité bien plus élevée d'induire de nouvelles fissions.

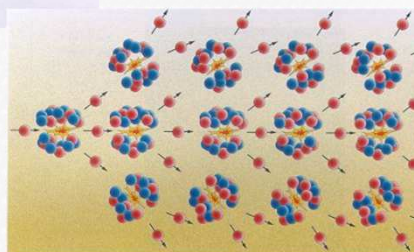


## Le fonctionnement d'un réacteur nucléaire à eau pressurisée

**Fission nucléaire** : sous l'impact d'un neutron, un noyau lourd tel que l'uranium 235 peut fissionner, et donner deux noyaux plus légers (les produits de fission) et quelques neutrons. La réaction libère une énergie 200 millions de fois que celle typiquement mise en jeu dans une réaction chimique entre atomes ou molécules.



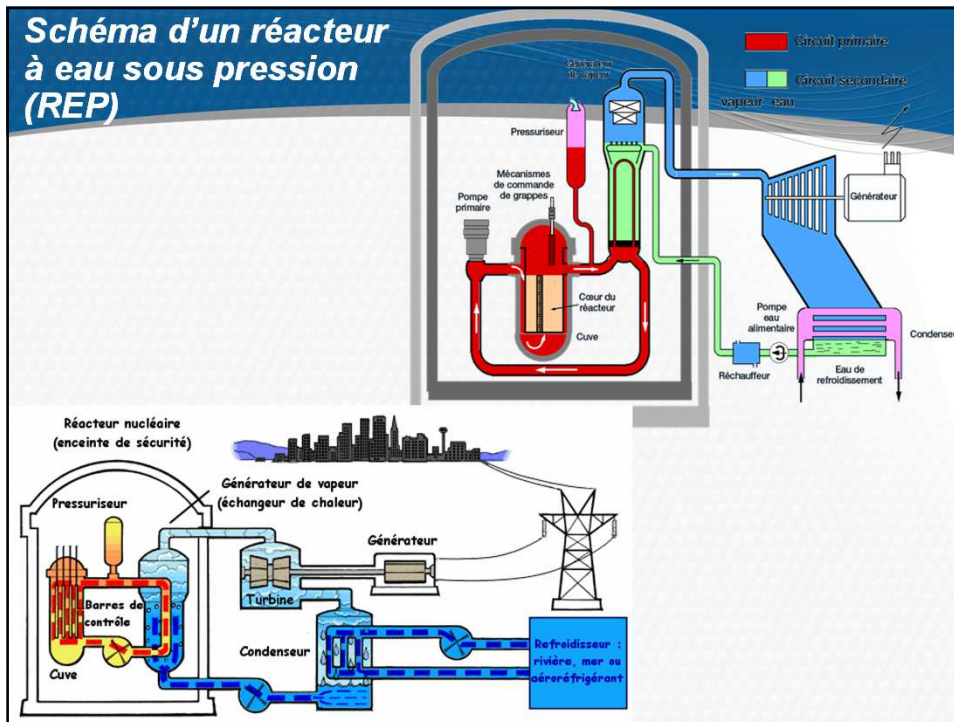
Les neutrons produits par une réaction de fission peuvent induire de nouvelles fissions d'autres noyaux fissiles présents dans leur voisinage, et contribuer ainsi à l'entretien de la **réaction en chaîne**.



## Le fonctionnement d'un réacteur nucléaire à eau pressurisée

Dans un REP, :

- l'eau est à la fois **caloporteur** et ralentisseur (**modérateur**) de neutrons.
- L'eau circule au travers d'une forêt d'**assemblages combustibles**, longs fagots de minces tubes métalliques en alliage de zirconium, où sont empilées des pastilles céramiques d'oxyde d'uranium ou de plutonium.
- Cette eau qui circule en circuit fermé dans un **circuit primaire** en acier très épais, cède ses calories en faisant bouillir l'eau d'un **circuit secondaire** dans un **générateur de vapeur**. La vapeur ainsi produite va actionner le **turboalternateur**.
- La vapeur est condensée grâce à un nouveau circuit d'eau, lui-même en contact thermique avec une source froide, atmosphère, rivière ou mer.



## Le combustible et son cycle

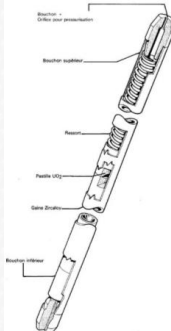
**Le combustible** nucléaire : conçu pour fournir la puissance attendue du réacteur, en utilisant au mieux la **matière fissile**. La conception de l'élément combustible doit en outre autoriser une certaine souplesse dans le fonctionnement du réacteur

L'assemblage combustible d'un réacteur à eau ordinaire est toujours constitué de «**crayons**» contenant les matières nucléaires, arrangés en réseau à maille carrée dans une «structure» assurant notamment le maintien mécanique des crayons.

**Le crayon** combustible est fait de **pastilles d'oxyde d'uranium** ou d'oxyde mixte d'uranium et de plutonium (diamètre et hauteur de l'ordre de 1 cm) empilées dans des tubes de métal (**gaines** en alliage de zirconium) fermés aux extrémités (étanchéité).

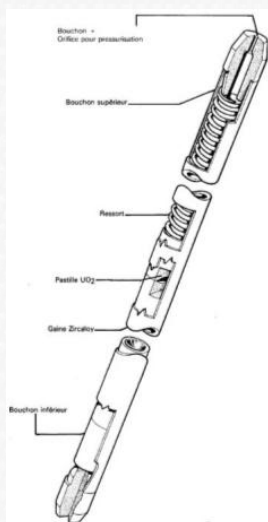


Pastilles de combustible  $\text{UO}_2$



Crayon combustible pour un réacteur REP

## Le combustible et son cycle



Grappe de contrôle

Embout supérieur

Tube-guide  
Grille de mélange

Crayon combustible

Embout inférieur

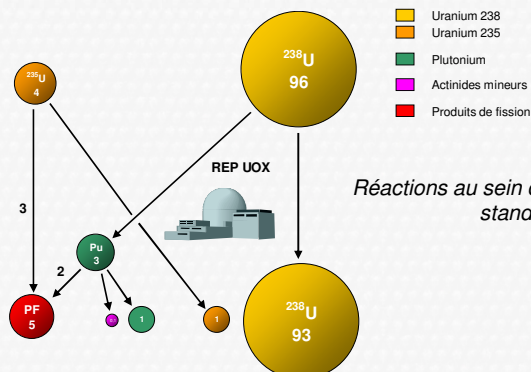
ASSEMBLAGE COMBUSTIBLE 17x17 ET GRAPPE DE CONTRÔLE

## Le combustible et son cycle

La gaine du crayon combustible doit rester étanche en situation incidentelle ou accidentelle, même en fin de vie du crayon combustible. Or :

- Certains **produits de fission sont gazeux** : leur production augmente progressivement la pression à l'intérieur des gaines ;
- La composition chimique des pastilles est modifiée par l'apparition des produits de fission et des actinides.

La céramique combustible **gonfle** sous irradiation et impose une contrainte à la gaine qui la contient (**interaction pastille-gaine**).



Réactions au sein des assemblages combustibles standard dans les REP

## Le combustible et son cycle

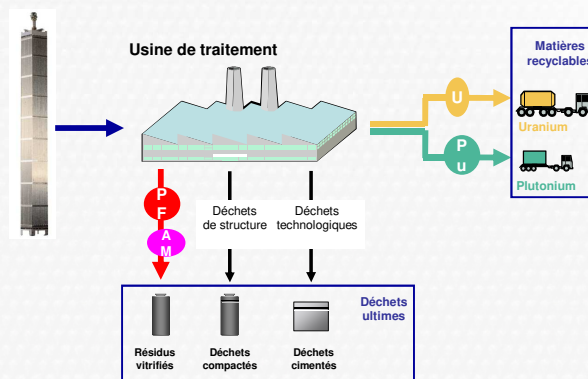


*Composition d'un assemblage de 500 kg d'uranium enrichi après son passage en réacteur*

La majeure partie de la radiotoxicité du combustible utilisé vient du plutonium. C'est une raison supplémentaire pour le recycler et ne pas le laisser dans les déchets.

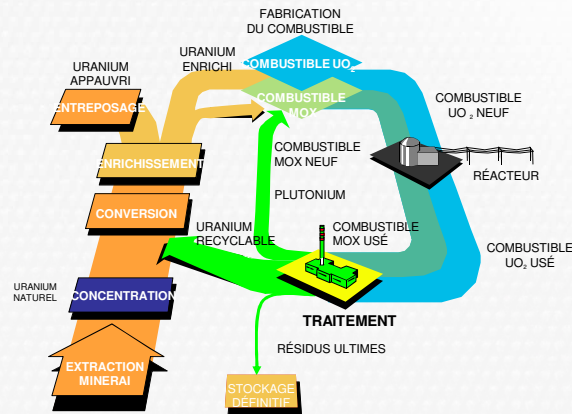
## Le combustible et son cycle

*L'usine de traitement de COGEMA à la Hague, dans laquelle sont réalisées les opérations de traitement du combustible utilisé, et de conditionnement des déchets.*





## Le cycle du combustible



## Le cycle du combustible

La gestion du combustible usé. Cette étape diffère selon que l'on considère un cycle "fermé" ou "ouvert".

**Le cycle ouvert**, qui n'est pas vraiment un cycle, se termine par la disposition finale du combustible usé, considéré alors en bloc comme un déchet. Le cycle ouvert est pour l'instant pratiqué aux États-Unis, en Suède...

**Le cycle du combustible fermé** est celui pratiqué en France, en Allemagne, en Suisse, au Japon. On y trouve les sous étapes suivantes :

- Traitement chimique du combustible usé pour récupérer les matériaux fissiles et fertiles qu'il contient encore, en vue de les recycler.
- Recyclage du plutonium sous forme de combustible MOX (acronyme de Mixed OXide fuel)
- Conditionnement des déchets, et, en particulier, vitrification des déchets très radioactifs issus de la fission.
- Disposition finale des déchets conditionnés.

## Les déchets radioactifs et leur gestion actuelle

### Les différentes catégories de déchets radioactifs

Pour leur gestion quotidienne, les déchets radioactifs sont classés selon deux critères :

- **Le niveau d'activité**, c'est-à-dire l'intensité du rayonnement qu'ils émettent, ce qui conditionne l'importance des protections à mettre en place pour se protéger de la radioactivité,
- **La période radioactive** des produits contenus, qui permet de définir la durée de leur nuisance *potentielle*.

On distingue ainsi en général trois catégories de déchets radioactifs.

**Catégorie A** : déchets de période courte (période radioactive inférieure à 30 ans) de faible et moyenne activité. Qui seront redescendues à un niveau proche de la radioactivité naturelle. Venir des centrales et des usines du cycle du combustible, des hôpitaux, des laboratoires, de l'industrie, etc.

**Catégorie B** : déchets de période longue (des milliers d'années) de faible et moyenne activité ( $\alpha$ ). Exemple : les tronçons de gaines des crayons combustibles usés,

**Catégorie C** : déchets de haute activité et de période longue, dégageant de la chaleur pendant plusieurs centaines d'années et restant radioactifs beaucoup plus longtemps.  
*Des combustibles usés non traités*

## Les déchets radioactifs et leur gestion actuelle



*Entreposage de déchets vitrifiés sur le site de COGEMA La Hague.*

## Le déclasséement et le démantèlement des installations nucléaires

Les installations nucléaires, quelle que soit leur nature - laboratoire, usine pilote ou de production, réacteur expérimental ou électrogène, installation de traitement des déchets radioactifs, etc. - ont une durée d'exploitation limitée.

A mesure que leurs installations nucléaires prennent de l'âge, de nombreux pays vont être amenés à en cesser l'exploitation, à les déclasser et à les démanteler. La fin de vie d'une installation nucléaire peut être entraînée par l'achèvement des programmes expérimentaux prévus dans l'installation, l'obsolescence des matériels et procédés, des considérations d'ordre économique (optimisation de moyens, coût de maintenance) ou de sûreté et sécurité (évolution de la réglementation).

Le déclasséement et le démantèlement (D-D) visent à permettre la libération partielle ou totale d'un site nucléaire.

On peut distinguer trois étapes pour le déclasséement d'une installation nucléaire : la fermeture définitive, la décontamination-démantèlement, puis la démolition et la libération du site.

## Sûreté et sécurité nucléaire

La conception, la construction et l'exploitation des installations nucléaires doivent prendre en compte les exigences de la sûreté, et leur impact sur l'Homme et l'Environnement doit être maîtrisé. Il s'agit là d'un maillon essentiel de l'acceptation de l'énergie nucléaire par le public.

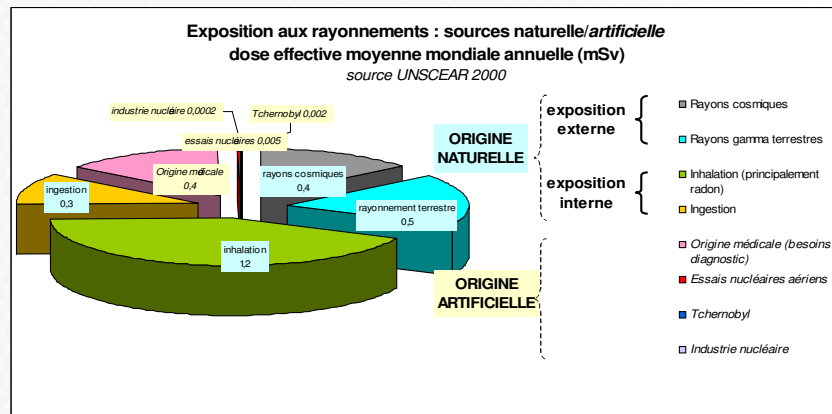
### Nucléaire et environnement

Il y a de la radioactivité partout dans l'environnement. Mais l'essentiel de cette radioactivité est d'origine naturelle.

En fonctionnement normal, l'impact environnemental des installations nucléaires est faible : les rejets de centrale (tritium) sont difficilement détectables (la radioactivité naturelle masque aisément la contribution) ; les rejets de l'usine de retraitement de La Hague sont plus importants et plus aisément détectables (iode 129 et tritium sont rejetés à la mer, krypton et tritium dans l'atmosphère).

## Sûreté et sécurité nucléaire

### Nucléaire et risques pour la santé



## Sûreté et sécurité nucléaire

### Sûreté et démonstration de sûreté

Dans l'industrie nucléaire comme dans toute activité humaine, le risque zéro n'existe pas. L'objectif de la démarche de sûreté n'est donc pas d'éliminer totalement les risques associés aux activités nucléaires.

La notion de sûreté est prise en compte dès la phase de conception des installations.

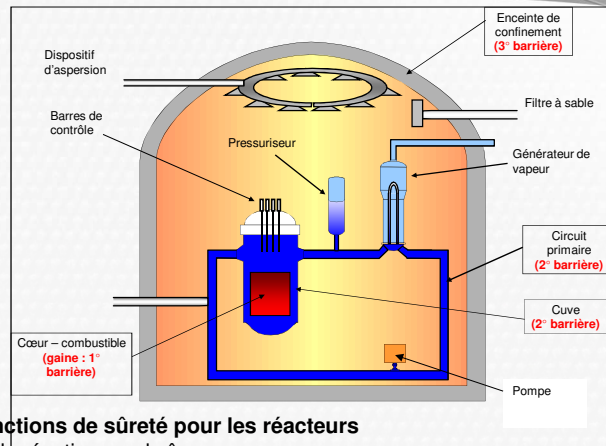
La spécificité de l'industrie nucléaire provient de la mise en œuvre de matières radioactives, qui sont susceptibles d'être dispersées dans l'environnement voire d'atteindre l'être vivant,

**L'étude de risques** fait l'objet d'une démarche classique :

- analyse technique de la sûreté et de la fiabilité de l'installation ;
- évaluation des risques liés à la dispersion de matières radioactives ou chimiques (impact sur l'homme et l'environnement), et à l'exposition des travailleurs et du public aux rayonnements (c'est tout le champ de la radioprotection) ;
- gestion des risques, comportant aussi bien le respect de la réglementation relative à la radioprotection que la mise au point de procédés de décontamination de sols et sites contaminés après un accident.



## Sûreté et sécurité nucléaire



### Les trois fonctions de sûreté pour les réacteurs

- Le contrôle de la réaction en chaîne.
- L'évacuation à tout moment de l'énergie produite dans le cœur, production qui se poursuit à hauteur de quelques % après l'arrêt de la réaction en chaîne (on parle alors de puissance résiduelle).
- Le confinement de la radioactivité, l'essentiel de celle-ci étant relative aux produits de fission formés dans le combustible.

## Sûreté et sécurité nucléaire

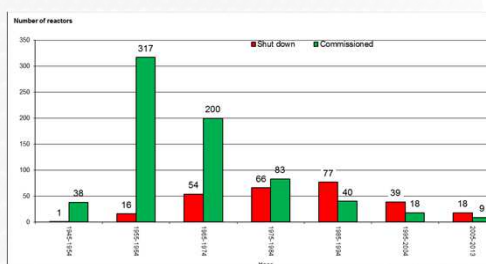
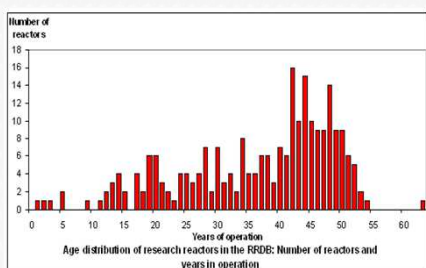
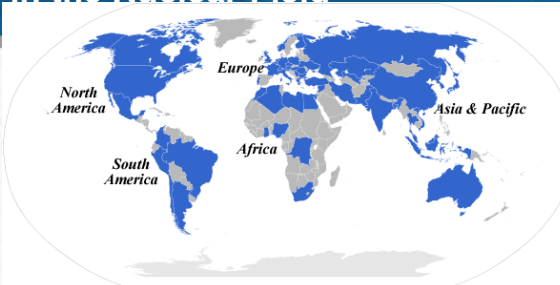
### La sécurité Nucléaire et les garanties

- ✓ Risques liés à la prolifération nucléaire
- ✓ Risques liés aux attentats terroristes
- ✓ Risques liés aux catastrophes naturelles
- ✓ Risques liés aux transports de matières nucléaires
- ✓ Risques liés au stockage des déchets nucléaires



## Current Key Players in the Nuclear Field

|                    |             |
|--------------------|-------------|
| <b>TOTAL</b>       | <b>~770</b> |
| Operational        | 216         |
| Temp. shutdown     | 22          |
| Under construction | 8           |
| Planned            | 10          |
| Permanent shutdown | 134         |
| Decommissioned     | 352         |



## RR stakeholders and users: great potential for opportunities!



## New RR Projects: *tentative overview*

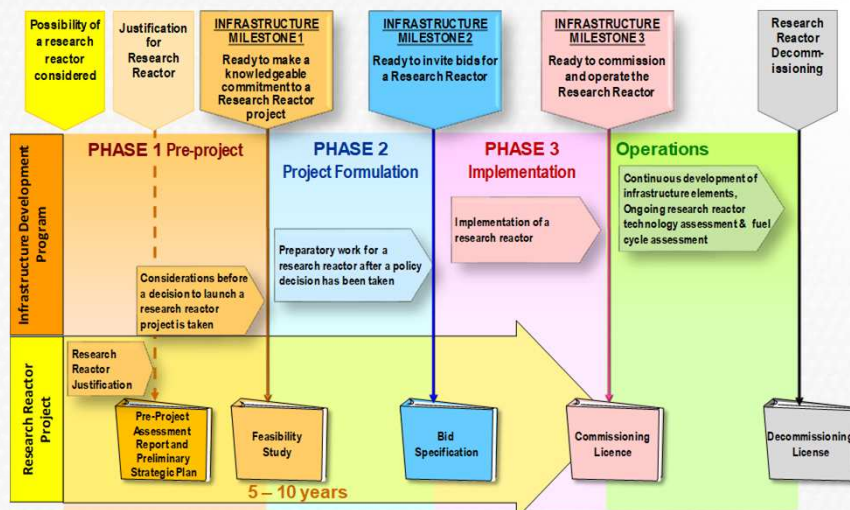
| Phase 1 (Consideration)<br>Total: 21 | Phase 2 (Preparatory Work)<br>Total: 7 | Phase 3 (Implementation)<br>Total: 8 |
|--------------------------------------|--|--------------------------------------|
| Azerbaijan                           | Belarus                                | Argentina                            |
| Bangladesh                           | Belgium                                | Brazil                               |
| Ethiopia                             | Bolivia                                | France                               |
| Ghana                                | The Netherlands                        | Jordan                               |
| Japan                                | Thailand (IHNI-MNSR)                   | India                                |
| Kenya                                | USA                                    | Republic of Korea                    |
| Kuwait                               | Vietnam                                | Russian Federation                   |
| Lebanon                              |  | Saudi Arabia (Low Power RR)          |
| Malaysia                             |  |                                      |
| Mongolia                             |  |                                      |
| Myanmar                              |  |                                      |
| Tajikistan                           |  |                                      |
| Philippines                          |  |                                      |
| Nigeria                              |  |                                      |
| Saudi Arabia (Multipurpose RR)       |  |                                      |
| Senegal                              |  |                                      |
| South Africa                         |  |                                      |
| Sudan                                |  |                                      |
| Tanzania                             |  |                                      |
| Thailand                             |  |                                      |
| Tunisia                              |  |                                      |



First criticality  
(25 Apr. 2016)

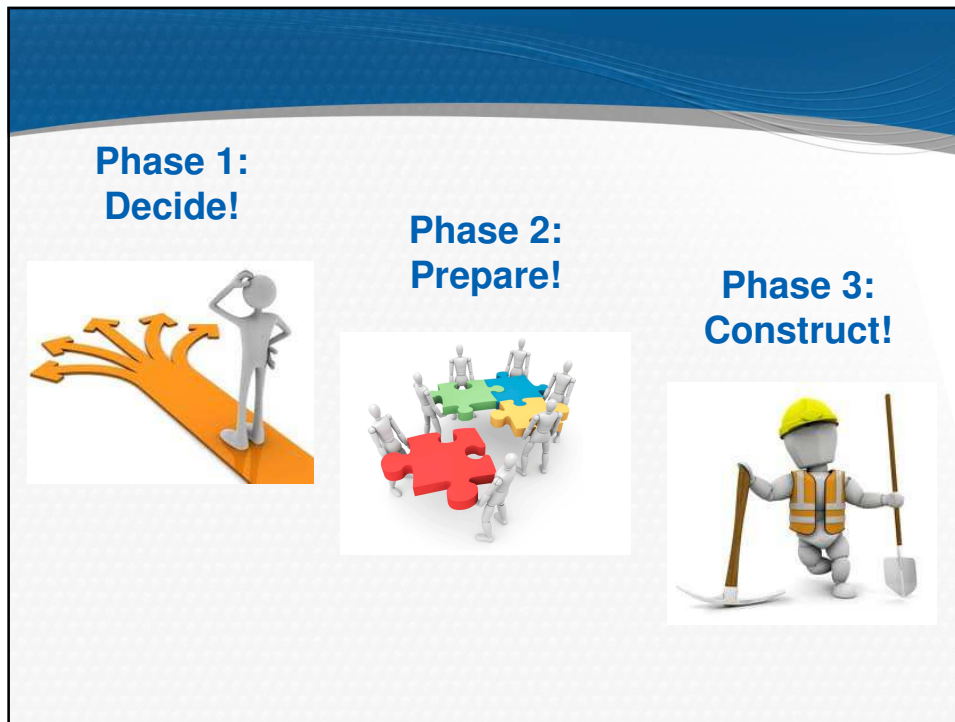
## Phases of implementation

### RR Project and Infrastructure Development Program



32





## RR Infrastructure Development

### Infrastructure Development Issues

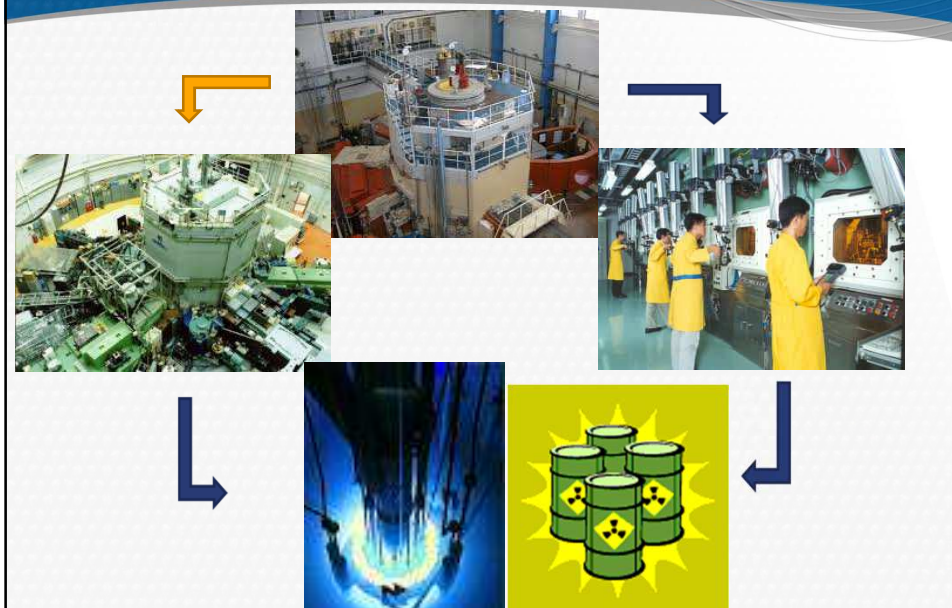
1. National position
2. Nuclear safety
3. Management
4. Funding and financing
5. Legislative framework
6. Regulatory framework
7. Safeguards
8. Radiation protection
9. Research reactor utilization
10. Human resources development
11. Stakeholder involvement
12. Site survey, site selection and evaluation
13. Environmental protection
14. Emergency preparedness and response
15. Nuclear security
16. Nuclear fuel management
17. Radioactive waste
18. Industrial involvement
19. Procurement

## Issues, Milestones and Conditions

| Issues |  | Milestone 1                                    | Milestone 2                                    | Milestone 3                                    |
|--------|--|--|--|--|
| (1)    | National position                          | C<br>O<br>N<br>D<br>I<br>T<br>I<br>O<br>N<br>S | C<br>O<br>N<br>D<br>I<br>T<br>I<br>O<br>N<br>S | C<br>O<br>N<br>D<br>I<br>T<br>I<br>O<br>N<br>S |
| (2)    | Nuclear safety                             |  |  |  |
| (3)    | Management                                 |  |  |  |
| (4)    | Funding and financing                      |  |  |  |
| (5)    | Legislative framework                      |  |  |  |
| (6)    | Regulatory framework                       |  |  |  |
| (7)    | Safeguards                                 |  |  |  |
| (8)    | Radiation protection                       |  |  |  |
| (9)    | Utilization                                |  |  |  |
| (10)   | Human resources development                |  |  |  |
| (11)   | Stakeholder involvement                    |  |  |  |
| (12)   | Site survey, site selection and evaluation |  |  |  |
| (13)   | Environmental protection                   |  |  |  |
| (14)   | Emergency preparedness and response        |  |  |  |
| (15)   | Nuclear security                           |  |  |  |
| (16)   | Nuclear fuel management                    |  |  |  |
| (17)   | Radioactive waste                          |  |  |  |
| (18)   | Industrial involvement                     |  |  |  |
| (19)   | Procurement                                |  |  |  |

35

## Research Reactors Generate Waste



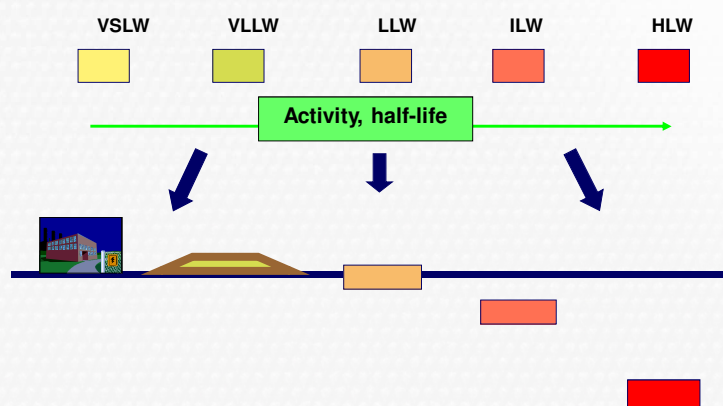
## Different Waste Types



- Gaseous, liquid, solid waste
- Low level, intermediate level, high level waste
- Irradiated fuel
- Exotic materials

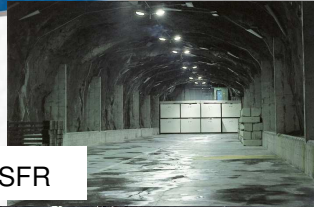
37

## Disposal solutions available



38

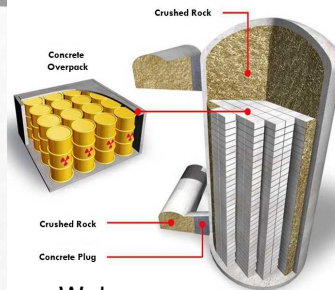
## LLW/ILW disposal in geological formations



SFR



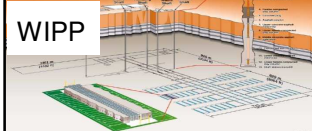
Dukovany



Wolsong



Bátaapáti



WIPP



Morsleben



Mochovce

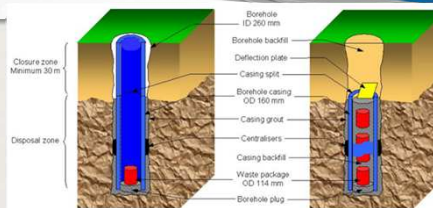
39

## Repositories for institutional waste



Richard repository in Czech Republic

Former limestone mine subsequently enlarged to act as a munitions factory



Borehole disposal concept for sources

- Not nuclear country
- Disposal facility for institutional waste
- Storage for Pu-bearing waste

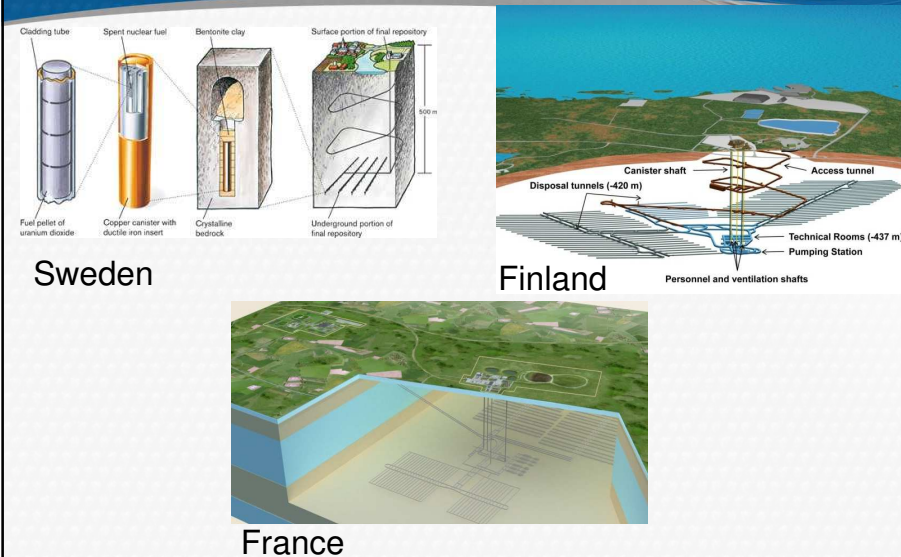


Halden repository in Norway



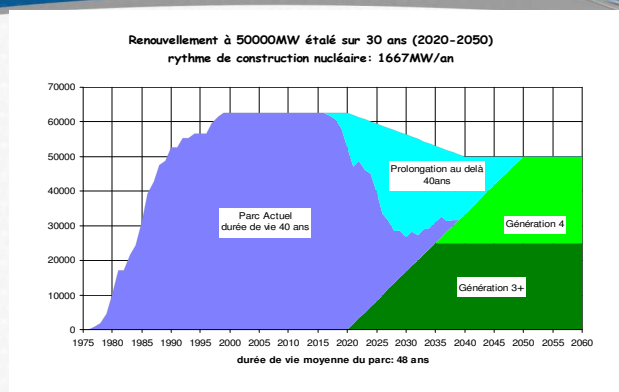


## HLW/SF disposal



41

## Des réacteurs nucléaires de 3<sup>ème</sup> génération

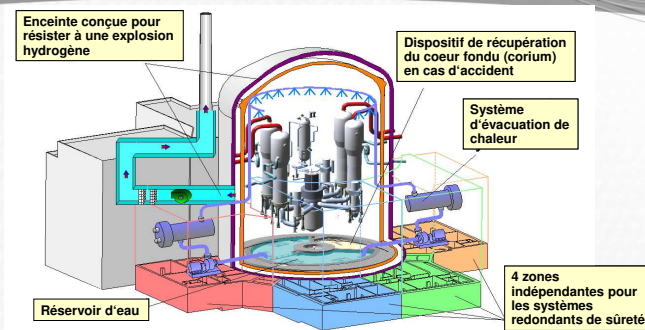


### Enjeux industriels

L'EPR répond à deux objectifs majeurs:

- Accroître la **compétitivité de l'énergie nucléaire** par rapport aux énergies fossiles.
- Renforcer encore la sûreté du réacteur.

## Des réacteurs nucléaires de 3<sup>ème</sup> génération



*Le projet EPR : un réacteur à eau pressurisée conçu d'après un large retour d'expérience des REP de deuxième génération, avec des exigences de sûreté accrues.*

## Des réacteurs nucléaires de 3<sup>ème</sup> génération

### Principales caractéristiques de l'EPR

Les caractéristiques de l'EPR, édictées par un souci omniprésent d'amélioration des performances et d'économie, peuvent se résumer comme suit :

- une **puissance** électrique nette d'environ **1 600 MWe** (à comparer aux 1 450 MWe du N4
- un **rendement** énergétique d'environ **36 %** (soit, en relatif, 10 % de mieux que les réacteurs de la génération précédente) dû principalement à l'accroissement des performances des générateurs de vapeur et des turbines,
- une **durée de vie** technique de **60 ans**, à comparer aux 40 ans en général pour les centrales actuelles.
- des charges d'exploitation réduites : **disponibilité** accrue avoisinant **92 %** contre 82 % aujourd'hui en partie due à des arrêts plus courts pour rechargement (de l'ordre de 16 jours) et aux choix de conception (maintenance des composants simplifiée), réduction des **doses d'irradiation** collective pour le personnel de maintenance (**0,5** contre 1 h.Sv/an actuellement),
- une **sûreté renforcée** alliée à des éventuelles fautes de pilotage, une défense en profondeur significativement améliorée vis-à-vis de la résistance aux éventuels accidents graves (fusion du cœur).

Le bénéfice apporté par cette sûreté renforcée se traduit par la non-nécessité d'évacuer les populations, même en cas d'accident grave.

## Les systèmes nucléaires du futur

### Le Forum International Generation IV

Les objectifs visés pour les systèmes du futur, de même que le choix des technologies clef pour les atteindre, font l'objet d'une coopération très active à l'international, notamment dans le cadre du Forum Generation IV. Système : Durables, Economiques, Sûres et fiables



## Maquette de réacteur de recherche RJH (CEA-Cadarache France)

