

IRSN

INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Faire avancer la sûreté nucléaire



Systeme de management
de la qualite IRSN certifie

La sûreté nucléaire et l'appréciation du risque : un progrès continu

G.B. Bruna

Congrès français de
Thermique

Gérardmer

28 au 31 mai 2013

SOMMAIRE

La sûreté nucléaire

- Quelques éléments de contexte
- Les fonctions de sûreté
- Les évaluations de sûreté

L'*Experientia*, moteur de progrès

- Les Agressions
- Le Facteur Humain
- La *R&D*

De GEN II à GEN IV - en passant par l'EPR -

Et aujourd'hui : Les événements du Japon

LA SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Quelques éléments de contexte

- La réaction nucléaire de fission : **de l'énergie, mais pas seulement ...** Elle :
 - dégage environ 200Mev d'énergie (environ 310^{-11} Joule)*
 - engendre en moyenne 2,5 neutrons secondaires
 - produit 2 produits de fission - PF - (radioactifs car dans un état excité)
 - Le neutron dans le réacteur : **une denrée rare**
 - Vitesse des neutrons en équilibre thermique avec la matière 2.2 Km/sec; vitesse moyenne des neutrons dans le cœur du réacteur 10^3 Km/sec
 - Flux moyen 10^{19} n/m².sec
 - Densité neutronique moyenne dans le cœur du réacteur 10^{13} n/m³
- *(1 eV - électronvolt - vaut environ 1.6×10^{-19} Joule)

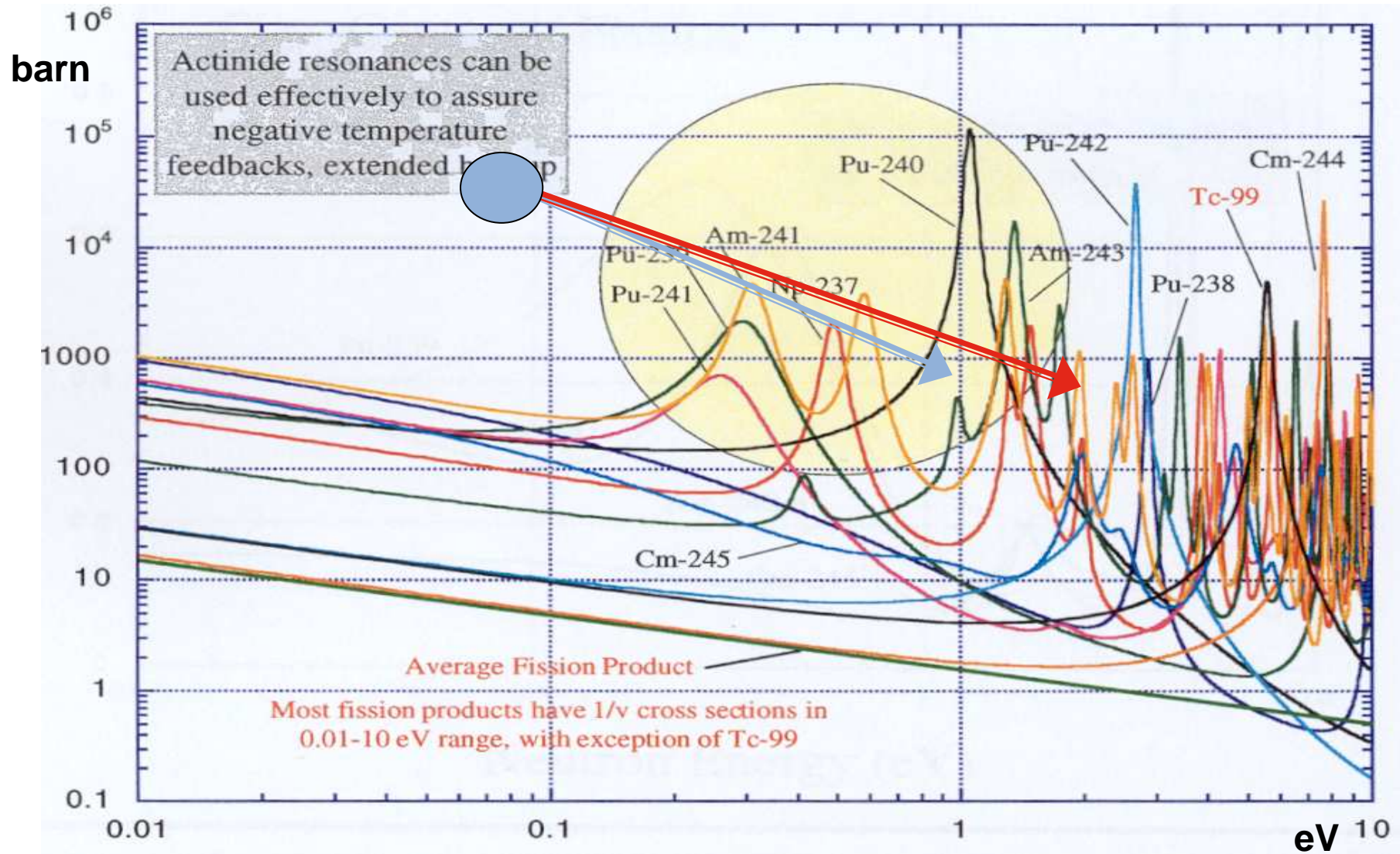
LA SÛRETÉ NUCLÉAIRE

■ Quelques éléments de contexte

▪ La réactivité

- La capacité des neutrons à interagir avec la matière dépend de l'énergie e et du mode de chargement du réacteur : **les sections efficaces**
- La capacité d'un système nucléaire à entretenir une réaction en chaîne dépend de sa masse et de ses dimensions (forme) : **la masse critique**
- Les neutrons secondaires de fission naissent à haute énergie; dans les réacteurs REP [Réacteur à Eau sous Pression], afin d'en augmenter le rendement en termes de fission, ils sont ralentis par l'eau : **l'effet modérateur & le coefficient de vide**

LA SÛRETÉ NUCLÉAIRE



LA SÛRETÉ NUCLÉAIRE

■ Quelques éléments de contexte

- Le point de fonctionnement (pour les REP : eau ~ 300 °C, 150 Bars, ΔT 50 sur 4 mètres);
- Le chargement du réacteur : **une spécificité gênante**
 - La perte de réactivité sur le cycle
 - Le besoin de compensation :
 - barres de contrôle,
 - bore soluble,
 - poisons consommables;
- La chaleur résiduelle : **un challenge majeur**
 - Il faut refroidir même après l'arrêt de la réaction en chaîne ... et ça pendant longtemps

LA SÛRETÉ NUCLÉAIRE

■ Quelques éléments de contexte

- **Le réacteur coté installation :**
 - Un grande complexité
 - Un encombrement important
 - Un besoin constant de refroidissement
 - Le LOCA - Accident de perte de réfrigération -
 - Une dépendance de l'extérieur (électricité, source froide ...)
 - La perte d'alimentation électrique, la perte de source froide : c'est Fukushima
 - Une vulnérabilité forte
 - aux agressions externes et internes
 - aux actes de malveillance

LA SÛRETÉ NUCLÉAIRE - en France -

Une partie à 4

■ Les exploitants

- EDF (maintenant SUEZ)
- CEA
- AREVA ...

■ Les pouvoirs publics

- Autorités administratives compétentes

■ Les experts techniques

- IRSN

■ Les parties prenantes

- Les citoyens et leurs représentations (Commissions Locales d'Information, CLI)

2 - LES FONCTIONS DE SÛRETÉ

La réactivité

- La maîtrise de la réaction en chaîne,
- La faculté de ramener le système en état sûr en cas de nécessité,

Le refroidissement

- Un refroidissement maîtrisé en fonction des circonstances,

Le confinement

- Interposition de barrières, afin d'éviter toute contamination de l'environnement et des hommes,
- Dépressurisation, si nécessaire,
- Filtration, épuration, piégeage ... (effluents, vapeurs, fumées, aérosols).

3 - L'ÉVALUATION DE SÛRETÉ

L'objectif de l'évaluation de sûreté des installations nucléaires - et, tout particulièrement, des réacteurs - est l'appréciation, et chaque fois que cela est possible, la quantification des risques potentiels inhérents à leur exploitation, incluant ceux qui tirent leur origine de :

- changements volontaires de la conception, de la gestion du combustible, de l'exploitation et de la conduite,
- ainsi que d'événements non maîtrisables et / ou non maîtrisés, comme les agressions (internes et externes) et les actes de malveillance ...

3 - L'ÉVALUATION DE SÛRETÉ

- **Pour atteindre cet objectif ambitieux, il est nécessaire de :**
 - Identifier toutes les sources de risque et évaluer leur contribution potentielle au risque global (**Etudes Probabilistes de Sûreté - EPS -**),
 - Analyser et comprendre les phénomènes physiques sus-jacents,
 - Maîtriser le comportement et le mode opératoire des systèmes, connaître leur faiblesses ... ;
- **Ceci est obtenu :**
 - En capitalisant l'expérience,
 - En effectuant des études et des expériences,
 - En tenant compte du contexte socio-économique.

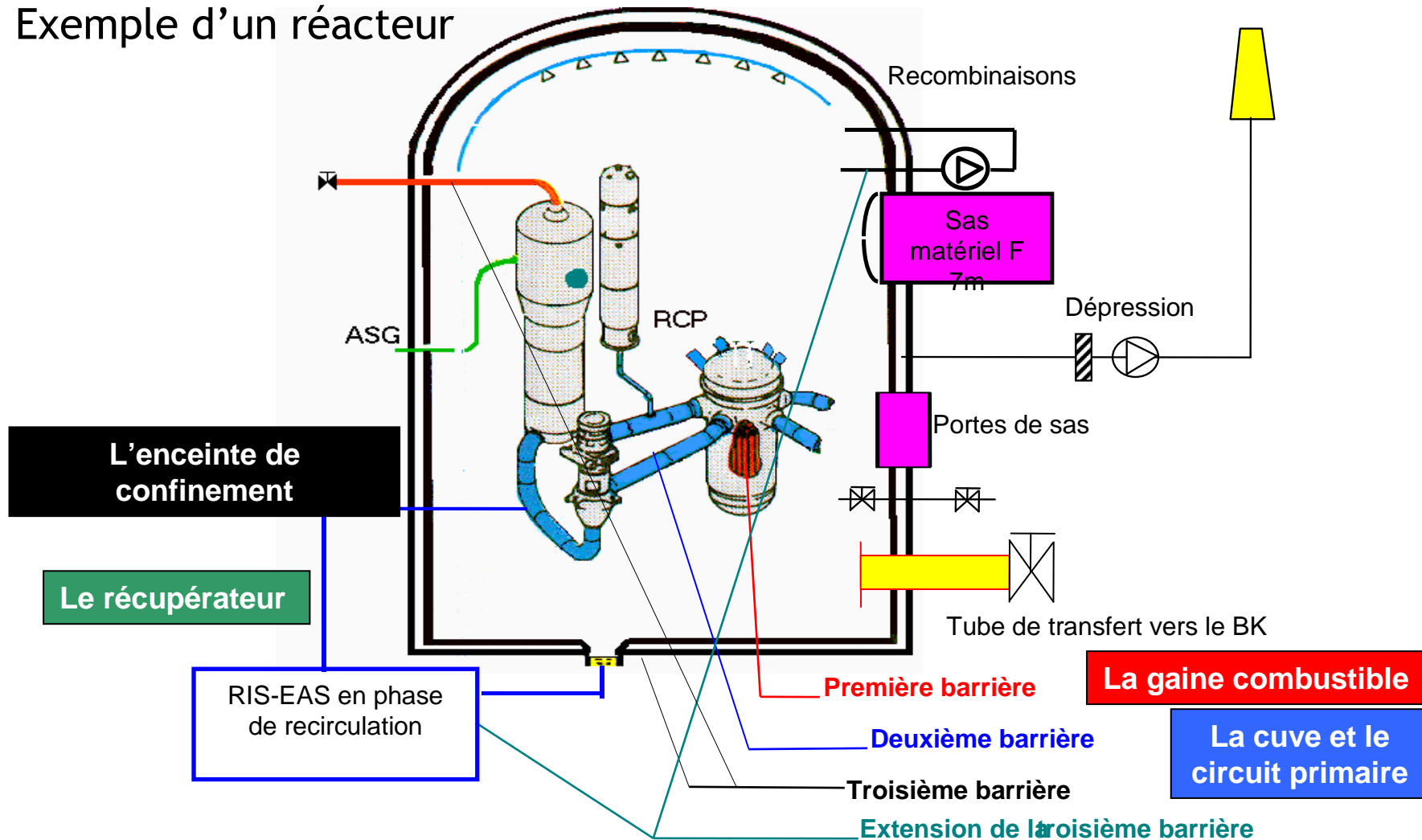
3 - L'ÉVALUATION DE SÛRETÉ

L'approche déterministe

- Les barrières de confinement;
- La *Défense en Profondeur - Defense in Depth DiD* - ;
 - Les trois barrières, pour les réacteurs :
 - La gaine du combustible,
 - La cuve et le circuit primaire,
 - L'enceinte de confinement;
 - Les états et les conditions de fonctionnement;
 - La catégorisation des accidents :
 - DBA
 - BDBA
 - Les règles d'études d'accidents.

LES BARRIÈRES DE CONFINEMENT

Exemple d'un réacteur



LIMITES & AMELIORATIONS

■ L'état sûr du réacteur : deux fausses bonnes idées

- On s'occupe avant tout du système lui-même. Les agressions externes sont prises en compte :
 - Par la prévention (pas d'étude de scénario)
 - Sous un aspect mono-forme
- Dès que le réacteur est à l'arrêt on est à l'abri (mais quel arrêt?)
 - Les incidents et accidents se développent à partir des situations de fonctionnement « en puissance »
 - En conséquence, on néglige les états initiaux « réacteur arrêté »

■ Le facteur humain et organisationnel est peu considéré

■ Et pourtant

- Les agressions externes, ça existe ...
- Les conditions d'arrêts sont à risque ...
- La défaillance est humaine ...

Le FACTEUR HUMAIN

THREE MILES ISLAND (1979)

■ L'accident est d'origine humaine :

■ Mauvaise interprétation des informations, conduite erronée

■ Le management des accidents

- L'introduction de l'approche par états
- L'amélioration de la salle de commande

■ La conduite et le facteur humain

- La redondance humaine
- La redondance procédurale

TCHERNOBYL

La version initiale : "C'est la faute aux opérateurs"...

Mais aussi :

- Une série de dysfonctionnements, comme à TMI...
- L'organisation de la sûreté
 - Des pratiques anormales, mais implicitement - et couramment - admises
- Des défauts de conception
 - Un coefficient de température modérateur très positif à faible puissance
 - Un coefficient de vide qui devient positif quand peu de grappes sont insérées
 - Une chute des grappes
 - Lente
 - Avec insertion de réactivité en début de course
- Le facteur humain
 - Des opérateurs hautement qualifiés ayant tendance à prendre des initiatives ...

TCHERNOBYL - LES LESSONS

D'une installation complexe

- On ne sait jamais "tout" .
- Il faut
 - Tirer profit du retour d'expérience
 - S'opposer à de fausses bonnes idées
 - « Ce n'est jamais arrivé en 20 ans, pas de risque que ça se produise maintenant »
 - « Pas ou peu d'importance, donc pas de conséquences »

Il faut donc:

- Aménager la défense en profondeur à l'exploitation
 - Prévention, détection des anomalies
 - Surveillance des fonctions importantes pour la sûreté
 - Maîtrise des incidents et des accidents
- Aménager des grands rendez vous
 - Les réexamens de sûreté
 - Les grandes visites décennales
- Traiter « en ligne » les événements en exploitation

LES AGRESSIONS EXTERNES - De multiples exemples

Neige et vent

Séisme et incendie

Coefficient de marée + vagues + houle

Impact et incendie

Basse température et agression source froide

Haute température et étiage

...

Séisme et tsunami !!!

SUPERPHÉNIX: Neige et vent

Février 1991. Acte 1 : Il neige

- Environ 40 cm, épaisseur moyenne
- Pas de panique, le toit du hall des machines résiste à 60 cm

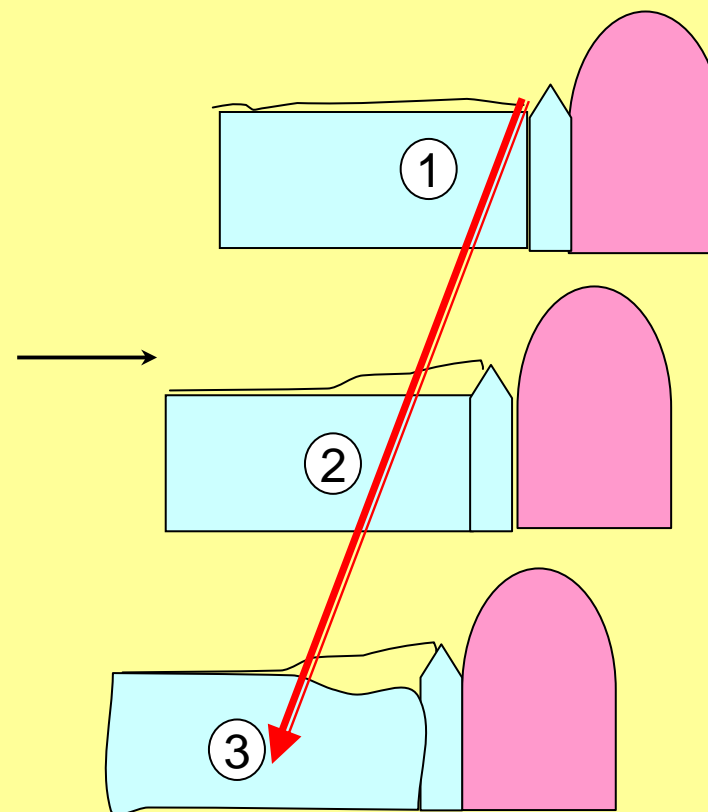
Acte 2 : Le vent de N/NE se lève

- Dans l'axe du hall des machines

Acte 3 : Le vent accumule la neige

- Épaisseur max : 1,20 m

Acte 4 : Le toit s'effondre



BLAYAIS

Coefficient de marée + vagues + houle

Le 27 décembre 1999

Dans la journée, une tempête d'une rare intensité

Le soir : pertes d'alimentations électriques extérieures

Au même moment, présomption d'entrées d'eau sur le site

- Alarme sur un premier marégraphe à 20 h 30
- Alarme sur un second marégraphe à 22 h 30

Alarmes marégraphes non gérées : la priorité est donnée à la perte de sources électriques

Plus tard, retour de l'alimentation principale

- En tranche 4 à 21 h 30
- En tranche 2 à 23 h 20

11 Septembre 2001

- Renforcement de la prise en compte d'actes terroristes
 - TMI1 était peut-être dans l'axe du *dernier avion*
- Menace difficilement quantifiable
 - Risques dispersés
 - Motivations difficiles à appréhender
- Menace échappant au seul contrôle des exploitants
- Scénarios dérivés
 - Attaque aérienne contre une INB
- Parade mise en œuvre
 - Déploiement de missiles sol-air à proximité des usines de retraitement de La Hague (portée, 20 kms, détection à basse altitude)

LA GÉNÉRATION III et III+

■ Défense en profondeur renforcée

- Intégration de la fusion du cœur en 4^e ligne de défense
- Elimination pratique des scénarios à rejets précoces

■ Réductions de probabilités « cœur découvert »

- Réduction du risque de transitoires à arrêt automatique du réacteur
 - Qui peuvent dégénérer
- Plus grande redondance et diversification des fonctions de sauvegarde
 - 4 voies
 - 1 ultime secours à 2 voies
- Allongement des délais disponibles pour les opérateurs
- Prise en compte des états d'arrêts
- Prise en compte de la piscine de stockage (bâtiment combustible)
- Considération donnée aux « synergies » entre agressions diverses
- Retour d'expérience des EPS intégré à la conception (*Risk Informed*)

LA GÉNÉRATION IV

- Les ambitieux objectifs du GIF - *Generation IV International Forum* - sont de proposer des concepts de réacteurs innovants permettant de répondre à des exigences fortes de :
 - Développement durable (minimisation de l'impact sur l'environnement)
 - Economie
 - Sûreté et sécurité
- La loi 2006 donne un cadre au développement de la GEN IV en France.

Pays membres du G.I.F.



Objectifs des Concepts de GEN-IV

Compétitivité économique

- Coût de l'énergie produite compétitif vs celui des énergies fossiles

Développement durable

- Durée de fonctionnement allongée (au delà de 60 ans)
- Minimisation de l'inventaire de matière fissile
- Réduction des déchets et terme de volume et activité

Sûreté

- Probabilité d'Accidents Graves extrêmement réduite
- Plans d'évacuation strictement limitées au site de la centrale

Sécurité et non prolifération

- Cycle du combustible réduisant l'accumulation de matériaux proliférant
- Protection efficace et accrue contre les agressions et les actes malveillants

Objectifs des Concepts de GEN-IV

Le développement durable

- **Cycle du combustible fermé :**
 - **Optimisation de l'utilisation des ressources et minimisation de l'inventaire de matière fissile,**
 - **Diminution du volume et de l'activité des déchets et réduction des coûts de stockage,**
 - **Gestion des déchets prise en compte dès la conception ;**
- **Multifonctionnalité : production**
 - **d'électricité,**
 - **d'hydrogène,**
 - **de chaleur industrielle.**

Objectifs des Concepts de GEN-IV

Une *sûreté* accrue

- Réduction du nombre de défaillances en fonctionnement normal (inspection, réparation, substitution ...),
- Protection accrue contre les agressions externes (impacts, malveillance ...),
- Probabilité très faible d'accidents entraînant de dommages sévères du cœur (Par la conception robuste, en conformité avec l'approche "*Risk Informed*"),
- **Mitigation des transitoires (par les systèmes de protections).**



Les concepts de GEN-IV

HTR/VHTR

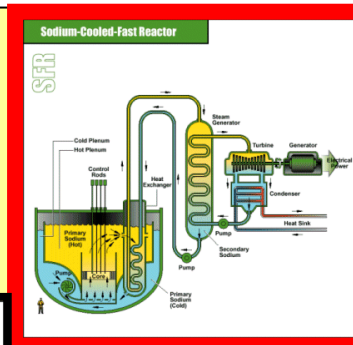
SFR

GFR

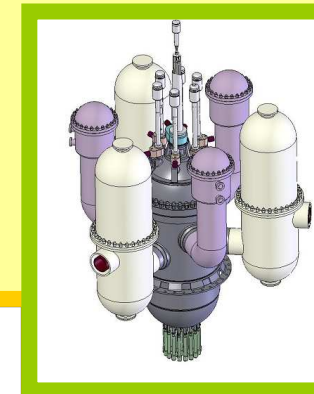
LFR

MSR

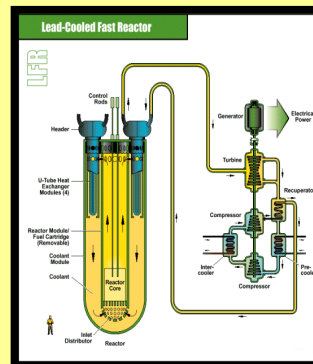
SCWR



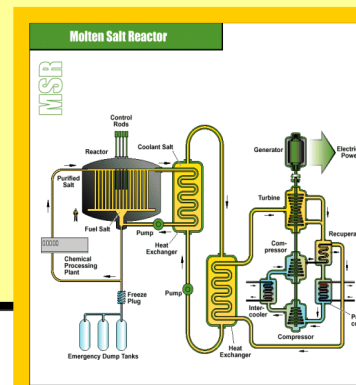
SFR



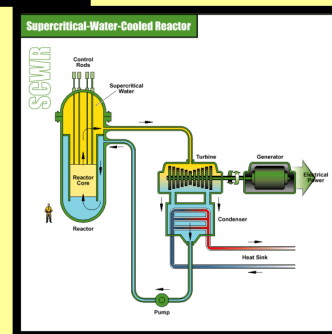
GFR



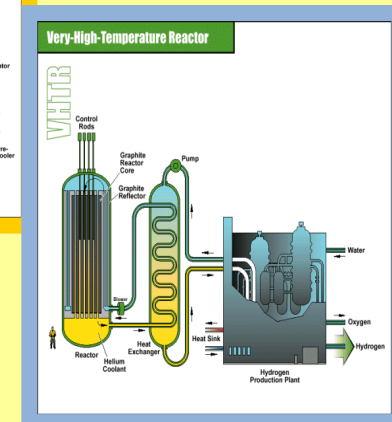
LFR



MSR



SCWR



HTR/VHTR

- **Le combustible** (comportement sous irradiation et/ou en transitoire, les codes et les méthodes et leur validation, les nouveaux matériaux et la conception avancée)
- **Les nouvelles technologies** permettant une meilleure exploitation des réacteurs (facteur humain et organisationnel, ergonomie, digitalisation ...),
- **Les conceptions avancées des PWR** (cœur à faible perte de réactivité, gestions innovantes du combustible ...)
- **La gestion du combustible utilisé et des déchets** (solutions avancées pour le stockage du combustible en piscine, classification des déchets ...)

- **L'impact environnementale des réacteurs** (barrages, cours d'eau, routes, activités commerciales, implantation humaine ...),
- **Les agressions externes** (impacts, malveillance, conditions climatiques extrêmes, changement climatique...) et **internes** (vieillesse, feu et fumée),
- **La démarche de sûreté, l'harmonisation et internationalisation des pratiques,**
- **Les accidents graves** (phénoménologie, mitigation, crise, radioprotection, gestion post-accidentelle ...)

LES EVENEMENTS DU JAPON

■ Ce qui n'était pas envisagé (ni envisageable ?) est arrivé :

- **Conjonction de deux agressions catastrophiques successives :**
 - **Tremblement de terre**
 - **Tsunami;**
- **Cause commune : le tremblement de terre en mer;**
- **Conditions environnementales extrêmes.**

■ Ceci a engendré :

- **La destruction de certains bâtiments,**
- **L'accumulation de débris,**
- **La perte d'alimentation électrique,**
- **La perte de réfrigération du cœur et des piscines,**
- **La difficulté durable de la reprise de la situation en raison des destructions, des difficultés d'accès ...**

Post FUKUSHIMA : premières considérations

▪ **Les Etats et les Organismes Internationaux ont réagi aux événements de Fukushima, en lançant des évaluations spécifiques - *stress tests* - pour prouver la robustesse de leur installations nucléaires.**

Sur recommandation de l'ENSREG ces analyses ont porté tout particulièrement sur l'évaluation des conséquences des Agressions naturelles :

- **Intégrité du confinement**
- **Revue périodiques de sûreté**
- **Prévention des accidents**
- **Mitigation des conséquences**
- **Adéquation des mesure site en cas de crise**

Mais les sujets particuliers suivants ont été aussi traités :

- **Apport d'aide extérieur en cas de crise**
- **Impact d'aéromobiles**

Post FUKUSHIMA : premières considérations



Post FUKUSHIMA : premières considérations

- **Les objectifs généraux de sûreté des Nouveaux Réacteurs sont pertinents, de même que les évolutions vers GEN III et GEN III+.**
- Le retour des plans d'évaluation de la robustesse des réacteurs en exploitation et en construction devra être intégré ;
- Pour les Nouveaux Réacteurs, il faudra notamment :
 - Etendre et approfondir les études d'agressions externes de site avant le choix de l'implantation des centrales,
 - Analyser au deuxième niveau les événements du Japon (REX plus riche) aussi pour le répercuter sur les programmes et les priorités en R&D;
- La priorité doit être donnée :
 - A l'intégration du retour d'expérience à tout niveau,
 - **À l'homogénéisation et internationalisation des exigences et des pratiques de sûreté.**

Après Fukushima: Combien un réacteur sûr l'est-il assez?

- 25 ans après Tchernobyl, nous pensions que nous rapprochions de l'équilibre en terme de réglementation. Fukushima ouvre de nouvelles - et pertinentes - interrogations qui vont bien au delà des "simples" question de la prise en compte des agressions et la **robustesse de la conception**.
- C'est quoi une conception "robuste"?
- Doit-on prendre en compte les événements rares - mais pourtant crédibles - dont les conséquences pourraient être dextrement sévères?
- Et si oui que doit-on faire? Du coté des concepteurs? Et des exploitants?

(DOES THE ACCIDENT IN JAPAN CALL FOR A MAJOR OVERHAUL OF NUCLEAR SAFETY REGULATIONS?, Dr. Nils J. Diaz
Embedded Topical Meeting: Fukushima 2012 ANS Winter Meeting San Diego, November 12-14, 2012)

Après Fukushima: Combien un réacteur sûr l'est-il assez?

■ En tirant les enseignements de Fukushima, nous devons garantir que la protection de l'environnement et des populations est en phase avec les connaissances actuelles et que les conséquences sociales et politiques d'un accident éventuel sont prises en compte de façon exhaustive.

- **Que signifie-t-il *Risque résiduel*?**
- **D'où vient-il le *Risque résiduel*?**
 - **Le problème de la conformité**
 - **La fabrication des composantes**
 - **L'inspection et les analyses non destructives**
 - **La maintenance**
 - **La réparation**
 - **Le remplacement de composantes**
- **Quelle part de *Risque résiduel* est-elle acceptable?**

(DOES THE ACCIDENT IN JAPAN CALL FOR A MAJOR OVERHAUL OF NUCLEAR SAFETY REGULATIONS?, Dr. Nils J. Diaz
Embedded Topical Meeting: Fukushima 2012 ANS Winter Meeting San Diego, November 12-14, 2012)