

L'approche sûreté dans les REPs

Pablo R. RUBIOLLO

Sommaire

- Bases de la sûreté nucléaire
- Sûreté à la conception
- Exemples d'application

- Bases de la sûreté nucléaire
- Sûreté à la conception
- Exemples d'application

Défense en profondeur

- La défense en profondeur consiste à prendre en compte de façon systématique les défaillances de dispositions techniques, humaines ou organisationnelles et à s'en prémunir par des lignes de défense successives
- La défense en profondeur est un concept qui s'applique à tous les stades de la vie de l'installation, de la conception à l'arrêt définitif

(P) Prévention: éviter que la défaillance se produise

((S)) Surveillance: anticiper sur la défaillance par exemple par des contrôles, des tests ou la détecter dès qu'elle survient

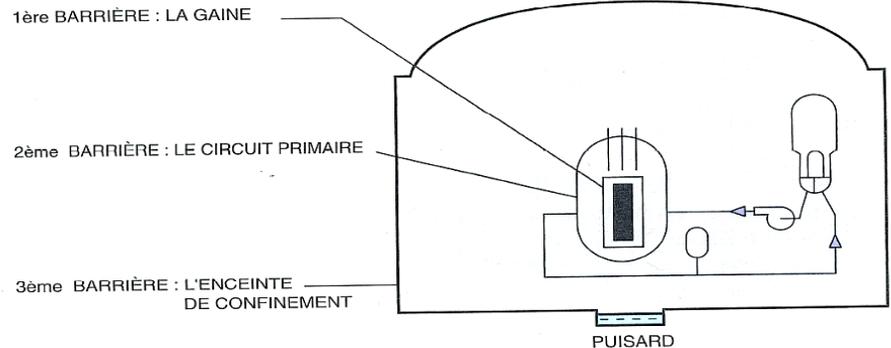
((((A))) Action: limiter les conséquences de la défaillance et/ou faire en sorte qu'elle ne puisse pas se reproduire

Trois catégories de lignes de défense en profondeur

Défense en profondeur

- La défense en profondeur a conduit à mettre en place une série des barrières pour limiter la dispersion des produits radiatifs dans l'environnement
- Quand le réacteur est en fonctionnement trois barrières entourent les PFs contenus dans le cœur: gaine, circuit primaire et enceinte
- Il faut chercher la meilleure étanchéité possible de ces barrières mais cette étanchéité ne peut pas être parfaite en permanence:

- Gaine: les performances du système de purification du circuit primaire permettent le fonctionnement du réacteur avec quelques crayons non étanches
- Circuit primaire: deux limites pour le débit de fuite du circuit primaire, (a) fuites quantifiées (2300 l/h) et (b) fuites non quantifiées (230 l/h)
- Enceinte: le taux de fuite est mesuré périodiquement en visite décennale et comparé par rapport aux limites



L'enceinte de confinement

La gaine des éléments combustibles

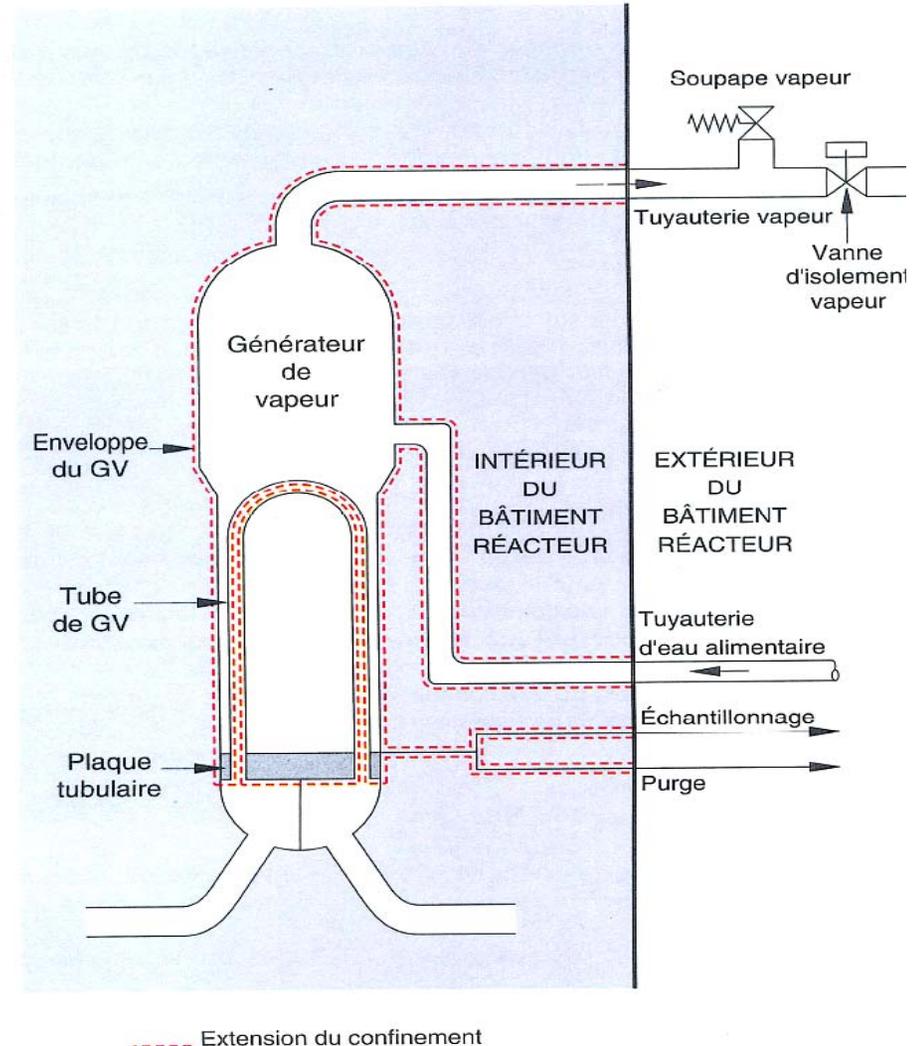


L'enveloppe du circuit primaire

Extension du confinement (3^{ème} barrière)

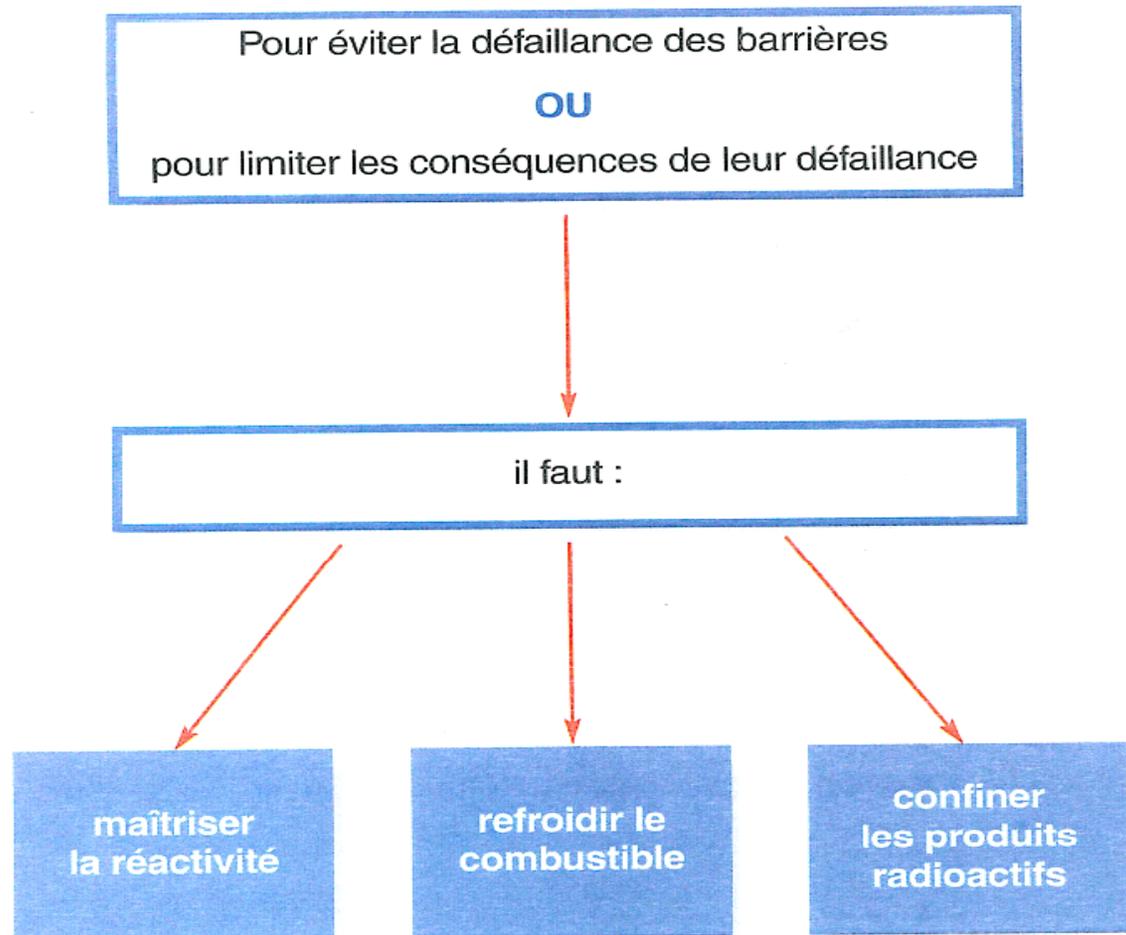
■ La barrière de confinement est constituée:

- Bâtiment réacteur lui-même
- Pénétrations de ce bâtiment
- Certains équipements qui constituent une extension de la troisième barrière
 - Tubes des GV
 - Enveloppe des GVs
 - Portions du circuit secondaire intérieur du bâtiment



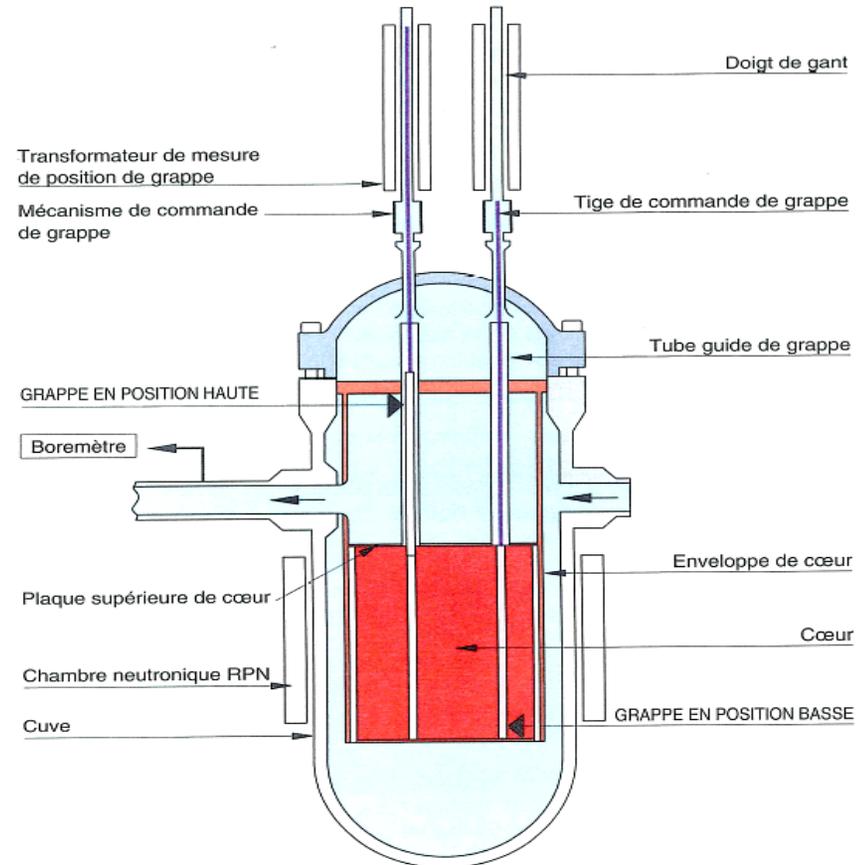
Les trois fonctions de la sûreté

- Afin d'éviter la dispersion des PFs contenus dans les pastilles et à l'intérieur de la gaine, l'énergie dégagée par la fission nucléaire doit être évacuée
- L'évacuation de l'énergie est assurée si :
 - La réactivité est maîtrisée
 - Le refroidissement des A/Cs est assuré
- Pour limiter les conséquences des défaillances des barrières plusieurs systèmes du réacteur existent pour limiter la dispersion des PFs



Maîtrise de la réactivité

- Fonctionnement normal:
 - Maîtriser l'énergie produite par le réacteur nécessite de contrôler la réactivité, à travers:
 - Grappes de commande
 - Bore
 - Poisons consommables
- Fonctionnement incidentel et accidentel
 - Le réacteur doit pouvoir être ramené à l'état de sous-criticité



Contrôle du refroidissement

■ Refroidissement normal

- En fonctionnement normal les pompes primaires assurent la circulation de l'eau et les GVs évacuent l'énergie
- Dans certaines phases si le condenseur n'est pas disponible, l'énergie est évacuée par décharge de la vapeur à l'atmosphère

■ A l'arrêt

- A l'arrêt du réacteur la puissance résiduelle est évacuée par les GVs
- Puis, après une baisse suffisante de la pression et de la température du circuit primaire, par le circuit de refroidissement à l'arrêt (RRA)

■ Cœur déchargé

- Les A/Cs irradiés sont entreposés dans la piscine du bâtiment combustible (BK) qui est refroidi par le circuit PTR

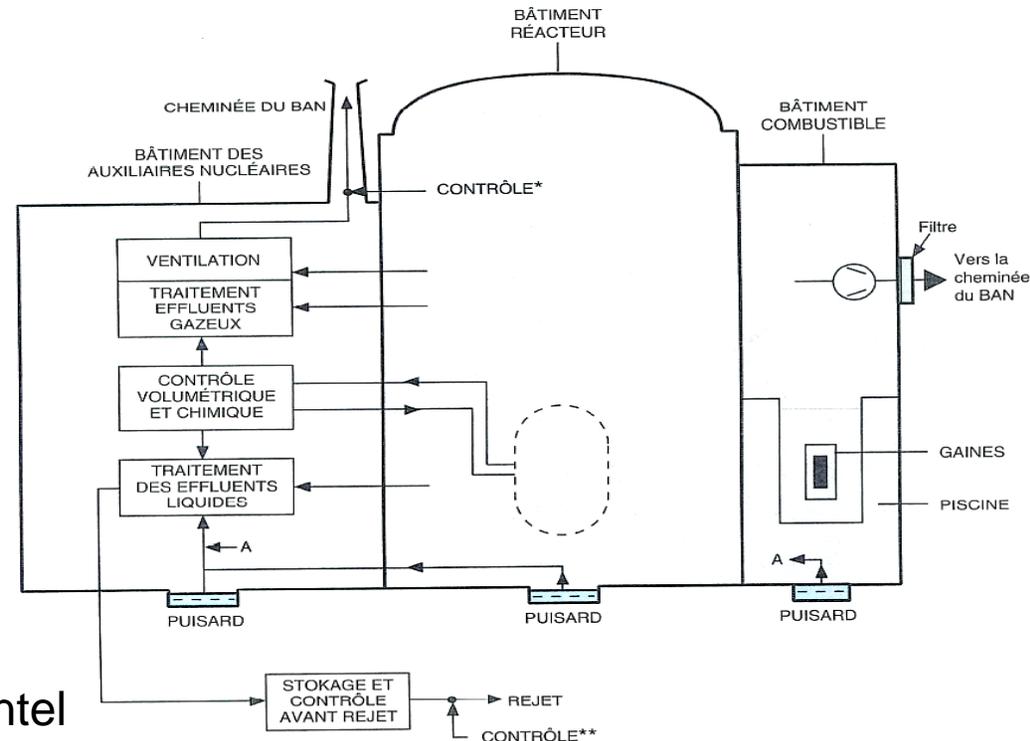
■ Fonctionnement incidentel et accidentel

- Les GVs alimentés par le système de secours (ASG)
- Circuit de refroidissement à l'arrêt
- Circuits d'injection de sécurité (RIS), EAS et PTR

	Matériel ou circuits utilisés	Source froide
Fonctionnement normal	- Générateurs de vapeur	- Eau alimentaire normale - Eau d'alimentation de secours des GV (ASG) et décharge à l'atmosphère (GCT)
A l'arrêt	- Générateurs de vapeur	- Eau ASG, décharge à l'atmosphère GCT
	- Circuit RRA	- Eau de réfrigération intermédiaire (RRI) refroidie par le circuit d'eau brute secourue (SEC)
Cœur déchargé	- Circuit PTR	- Eau RRI refroidie par le circuit SEC
Fonctionnement accidentel	- Générateurs de vapeur	- Eau ASG, eau déminéralisée, eau brute, décharge à l'atmosphère GCT
	- Circuit RRA	- Eau RRI refroidie par le circuit SEC
	- Circuit d'injection de sécurité (RIS)	- Eau de la bache PTR
	- Circuit d'aspersion de l'enceinte (EAS) - Circuit PTR	- Eau RRI refroidie par le circuit SEC

Contrôle du confinement

- Les trois barrières et plusieurs systèmes du réacteur contribuent à cette fonction (Systèmes de stockage et de traitement des effluents, Circuit de contrôle volumétrique, etc.)
- Fonctionnement normal
 - Étanchéité enceinte et traversées
 - Mise en dépression par rapport à l'extérieur
 - Traitement des fuites au moyen de filtres et de pièges à iode
- Fonctionnement incidente et accidentel
 - Arrêt automatique du réacteur (1 et 2 barrière)
 - Soupapes du pressurisateur (2 barrière)
 - Vis-à-vis de la 3ème barrière
 - Isolement automatique de l'enceinte
 - Aspersion de l'enceinte
 - Recombinaison de l'hydrogène



- Décompression de l'enceinte
- Filtres

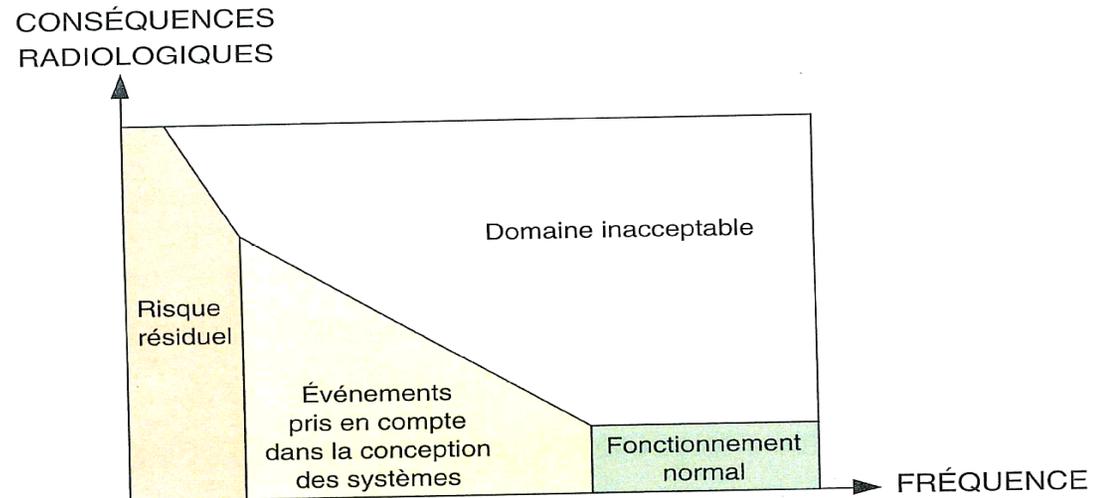
- Bases de la sûreté nucléaire
- Sûreté à la conception
- Exemples d'application

Défense en profondeur à la conception

- La démarche initiale de conception des centrales est une démarche déterministe
- Cette démarche consiste à recenser les événements pouvant conduire à la dispersion des PFs et à définir des accidents enveloppes
- L'objectif est de maintenir les risques à des niveaux acceptables grâce à la défense en profondeur
- L'approche déterministe est ensuite complétée par une approche probabiliste (EPS)

Fréquence versus conséquences

- Pour des événements fréquents (probabilité élevée) les conséquences doivent rester minimales
- Pour des événements plus rares (probabilité faible) les conséquences peuvent être plus importantes
- A la limite, des événements de probabilité encore plus faible ne justifient pas de protection particulière



Événements pris en compte

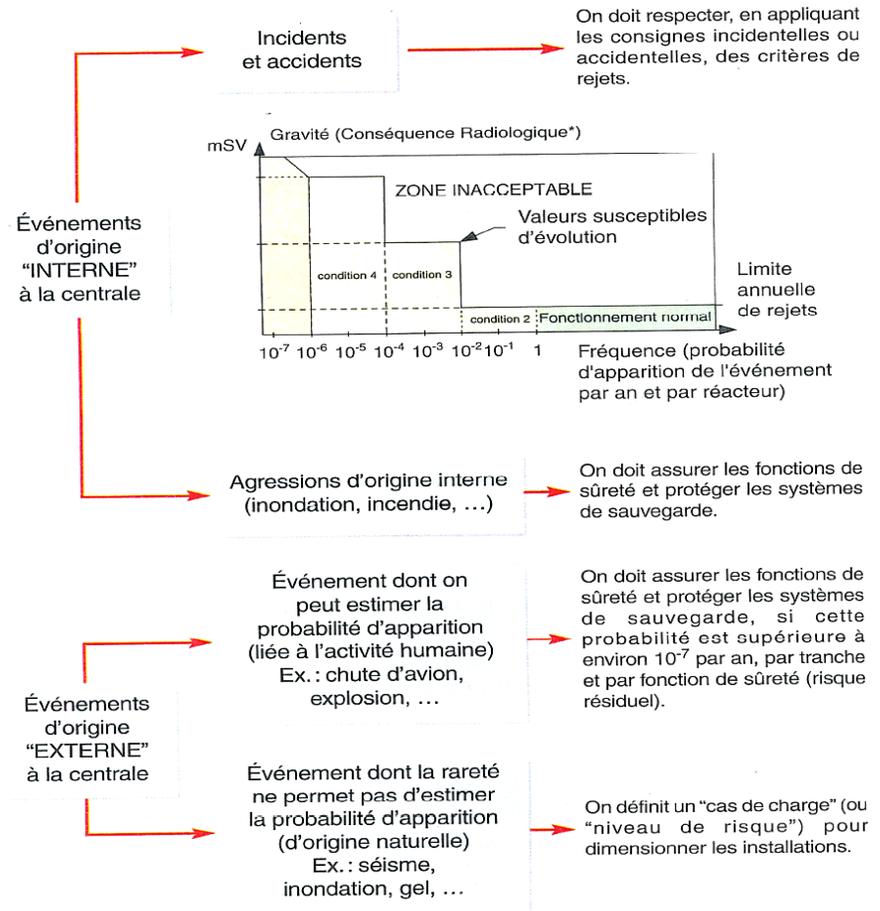
Événements pris en compte

- La conception et le dimensionnement des bâtiments, systèmes et matériels sont effectués à partir de l'analyse des événements et agressions pris en compte dans l'approche déterministe:

- Événements d'origine interne:

- Incidents et accidents
- Agressions d'origine interne: incendie, inondation suite a des fuites de circuits primaires, etc.

- Événements d'origine externe: séisme, inondation, chute d'avion, etc.



* on calcule la "dose efficace" (somme des doses équivalentes dans les divers tissus ou organes par suite d'une incorporation multipliée par les facteurs de pondération tissulaire)

Conditions de fonctionnement (ANSI/ANS 18.2)

- Un événement qui se produit sur une installation d'une centrale doit être évalué sous deux aspects:

- Conséquences sur le cœur et sur les rejets:
 - Le rapport de sûreté classe les événements en fonction de leur fréquence d'occurrence
 - Pour chaque condition, les limites réglementaires ou la valeur repère de rejets radiologique doivent être respectés
- Conséquences sur les équipements sous pression:
 - Cat. 2: pression $< P_{\max}$
 - Cat. 3: soupapes doivent limiter la pression à 100 bar
 - Cat. 4: éviter la perte d'intégrité par surpression de l'appareil

Condition	Désignation et ordre de grandeur de la fréquence f^*	Conséquences radiologiques**	Impacts sur la conception	Impacts sur le fonctionnement
1 Normal	Situations normales Transitoires normaux d'exploitation	Rejets d'effluents radioactifs dans les limites autorisées par les "nouveaux arrêtés"	Dimensionnement des 1 ^{ère} et 2 ^{ème} barrières et des régulations Définition des limites de sécurité Choix des matériaux	Fonctionnement normal de l'installation (respect des STE)
2 Incident	Situations perturbées Incidents mineurs $10^{-2} < f < 1$	Rejets d'effluents radioactifs dans les limites autorisées par les "anciens arrêtés"	Dimensionnement des systèmes de protection (à partir de la condition 2)	Arrêt de la tranche suivi d'un redémarrage après élimination des causes
3 Accident	Accidents peu probables $10^{-4} < f < 10^{-2}$	Doses faibles Quelques crayons de combustible endommagés Pas de défaillance des 2 ^{ème} et 3 ^{ème} barrières	Dimensionnement des systèmes de sauvegarde (à partir de la condition 2)	Arrêt de la tranche suivi d'un arrêt éventuel de longue durée pour réparation. Pas de contrainte d'accès autour du site
4 Accident	Accidents hypothétiques $10^{-6} < f < 10^{-4}$	Doses plus importantes Pas de défaillance de la 3 ^{ème} barrière	Condition 4: Dimensionnement de la 3 ^{ème} barrière	Arrêt de la tranche pour une durée indéterminée

Classification des situations de fonctionnement de la chaudière

Classe 1	Fonctionnement normal
Classe 2	Incidents de fréquence modérée
Classe 3	Accidents de fréquence faible
Classe 4	Accidents graves et hypothétiques

Application de la défense en profondeur à ces risques

LIGNES DE DÉFENSE

■ Prévention

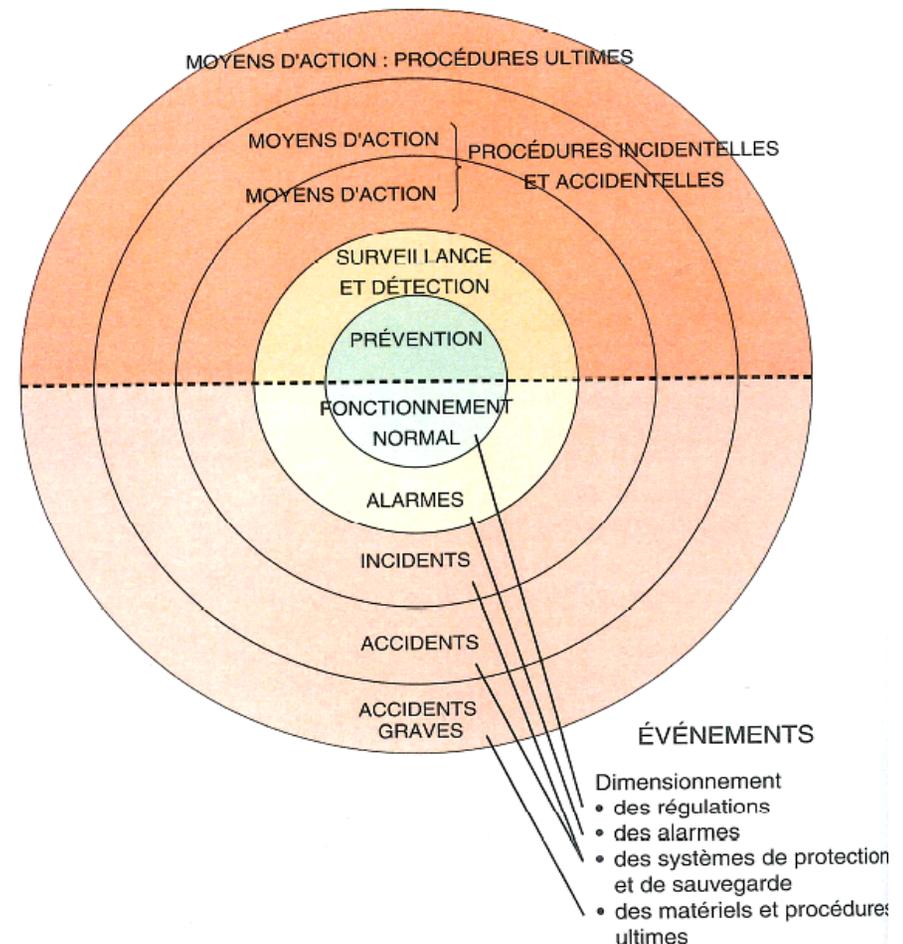
- Barrières
- Trois fonctions de sûreté
- Systèmes de régulation
- redondance, etc.

■ Surveillance

- Définition de systèmes de contrôle
- Définition de l'instrumentation
- Dispositions prises en compte pour permettre la surveillance, etc.

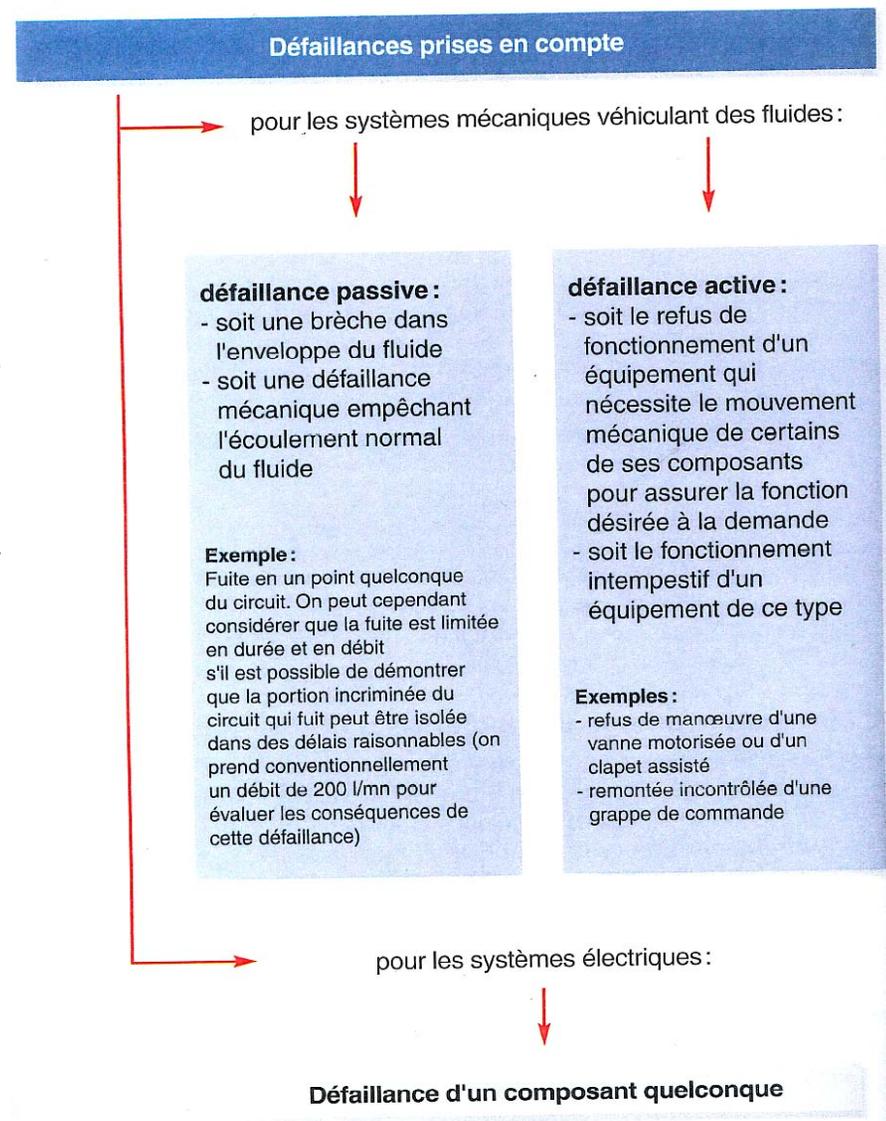
■ Action

- Définition des systèmes de sauvegarde et procédures accidentelles
- Prise en compte des accidents graves
- Limitation de conséquences radiologiques



Prévention des défaillances

- Les équipements sont classés en fonction de leur importance pour la sûreté (IPS: 1, 2, 3, IPS-NC, etc.)
 - Ce classement détermine le niveau des exigences à respecter pour la conception, la réalisation et l'exploitation des centrales
- Critère de défaillance unique
 - Les systèmes qui assurent les fonctions sûreté lors des incidents ou accidents et leurs systèmes de support doivent pouvoir assurer leur fonction en cas de défaillance de l'un de leurs composants
 - Systèmes mécaniques: redondance
 - Systèmes électriques: redondance, sources électriques indépendantes et secourues
- Prévention des défaillances de mode commun
 - Séparation physique
 - Diversification



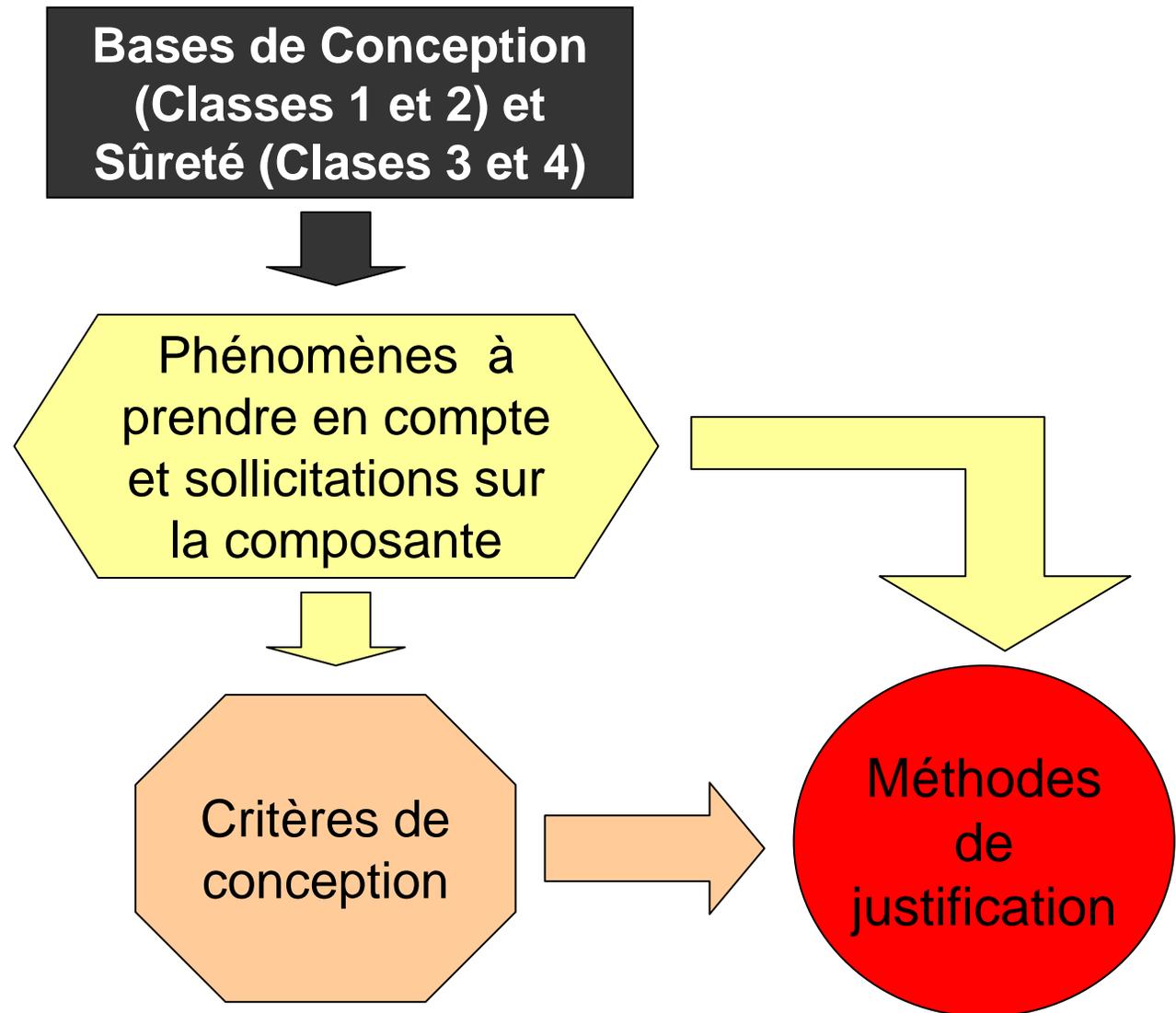
- Bases de la sûreté nucléaire
- Sûreté à la conception
- Exemples d'application

Bases générales de conception et de sûreté

Le cœur du réacteur et ses systèmes associés de refroidissement principal, de régulation, de protection, éventuellement de sauvegarde, sont conçus de façon à assurer:

- Maintien de l'intégrité de l'assemblage en conditions 1 et 2. Néanmoins, le réacteur peut être maintenu en fonctionnement normal avec quelques crayons non étanches compte tenu des performances du système de purification du circuit primaire
- Suite à un accident de classe 3, le réacteur peut être ramené à un état sûr avec une faible fraction de crayons endommagés, bien que cet endommagement puisse cependant empêcher la reprise immédiate du fonctionnement normal du réacteur
- Suite à un accident de classe 4, le réacteur peut être ramené à un état sûr et le cœur maintenu à l'état sous critique, tout en préservant pour ce dernier une géométrie permettant son refroidissement

Règles de conception d'une composante



Bases de la conception et de sûreté de l'assemblage combustible (A/C)

- La conception de l'assemblage doit permettre de vérifier:
 - Conditions de fonctionnement de classes 1 et 2
 - Maintien de l'intégrité de la première barrière
 - Il n'y a pas de déformation mécanique inacceptable, en particulier le maintien de la géométrie du réseau
 - Conditions de fonctionnement accidentelles (classes 3 et 4)
 - Il n'y a pas de perte de fonction, c'est-à-dire l'insertion des grappes de réglage est possible et que la géométrie du réseau est apte au refroidissement du cœur

Exemple: système de maintien de l'A/C

■ Phénomènes à prendre en compte:

- Relaxation des contraintes dans les ressorts de maintien
- Débit maximal prévu en situation de fonctionnement de classe 1
- Efforts hydrauliques axiaux: perte de charge dans l'assemblage en tenant compte des incertitudes associées
- Jeu entre assemblages et plaques de cœur (et tous les phénomènes associés)
- Impact des efforts de compression des ressorts de maintien sur la déformation de l'assemblage

■ Critères de conception:

- Le système de maintien doit empêcher tout déplacement vibratoire entre l'embout inférieur et la plaque inférieure de cœur afin de se prémunir contre toute cause potentielle d'usure des pions de centrage de celle-ci ou d'usure entre les crayons et les grilles.
- Dans le cas des transitoires de classe 1 et 2 conduisant à une survitesse des pompes, on vérifie la non plastification des ressorts (donc un décollement de l'assemblage peut être admis)

Exemple: grilles de l'A/C

■ Phénomènes à prendre en compte:

- Aspects thermo-hydrauliques: perte de charge, flux critique
- Aspects mécaniques: flambage, usure crayon-grille, vibration
- Aspects neutroniques: fluence et relaxation des supports
- Aspects matériaux: grandissement sous irradiation et corrosion

■ Critères de conception:

- Maintenir les positions axiales et radiales des crayons de combustible: pas du réseau (neutronique et géométrie de refroidissement)
- Support du crayon au niveau de la cellule de la grille: force de maintien, vibration du crayon
- Caractéristiques hydrauliques (perte de charge)
- Performance thermohydrauliques (flux critique)
- Fabrication de l'assemblage
- Aptitude de manutention
- En situation accidentelle: pas de déformation permanente de la grille au cours de sollicitations accidentelles telles que APRP ou séisme. Cette condition est vérifiée si l'effort de compression appliqué à la grille ne produit pas de déformation permanente. Le critère est donc que la contrainte ne dépasse pas la charge limite de déformation plastique de la grille à la température de fonctionnement normal

Exemple: crayons combustibles

■ Phénomènes à prendre en compte

□ Phénomènes thermiques:

- Surchauffe de la gaine

□ Phénomènes mécaniques

- Interaction mécanique pastille-gaine
- Fatigue
- Flambage circonférentiel de la gaine
- Éclatement de la gaine
- Usure par frottement

□ Phénomène chimiques

- Oxydation
- Hydruration
- Corrosion sous tension

Crayons combustibles: critères de conception

■ Température de la gaine

- La température de la gaine ne doit pas dépasser de façon significative la température du réfrigérant, de manière à éviter la rupture de gaine par surchauffe du Zircaloy ou corrosion accélérée (ce calcul tient compte de la présence de la couche de zircone)
- Pour ce faire, le rapport minimal de flux critique est évalué pour les conditions pénalisantes de fonctionnement du réacteur. Le flux de chaleur local doit être supérieur dans les conditions les plus défavorables (classe 2) à une valeur qui tient compte des incertitudes statiques (RFTC)
- D'autres critères tels que la température de gaine, oxydation, fragilisation sont aussi utilisés
- En situation accidentelle: des limites sur le nombre des crayons en ébullition, la température maximale de gaine et l'épaisseur oxydée de la gaine sont utilisées

■ Fusion du combustible

- La valeur maximale de la température du combustible, calculée en tenant compte des effets de l'irradiation, des tolérances et des incertitudes, doit rester inférieure à la valeur conduisant à la fusion

■ Grandissement des crayons combustibles

- Le grandissement des crayons sous irradiation doit être tel que le jeu accumulé entre le crayon et les embouts ne s'annule pas pendant leur séjour en réacteur

■ Grandissement des crayons combustibles

- Le grandissement des crayons sous irradiation doit être tel que le jeu accumulé entre le crayon et les embouts ne s'annule pas pendant leur séjour en réacteur

Crayons combustibles: critères de conception

■ Fléchissement en réacteur des crayons combustibles

- Les crayons fléchissent pendant l'irradiation, ce qui diminue l'espacement entre crayons adjacents. Une limite maximale d'arcure est calculée et ne doit pas être dépassée.

■ Pression interne

- La pression interne du crayon a un effet significatif sur sa tenue au fluage, au flambage et au ballonnement. La pression interne à chaud, due au cumul de la pression d'hélium de remplissage du crayon neuf et de celle des gaz de fission, doit être inférieure à la pression qui provoquerait, en fonctionnement normal, la réouverture du jeu diamétral entre les pastilles et la gaine, par fluage en traction de la gaine. Ce critère permet d'éviter une instabilité thermoplastique (accroissement de jeu qui provoque échauffement de la pastille, relâchement des PFs et augmentation de la pression interne)

■ Corrosion

- Doit être limitée pour assurer l'intégrité de la gaine
- La tenue à la corrosion doit être étudiée dans des conditions du réacteur, en considérant l'oxydation, l'hydruration et les dépôts de produits de corrosion
- La température maximale de gaine (qui doit tenir compte de la couche de zircone) doit rester inférieure à la valeur qui conduira à des conditions d'oxydation accélérée

■ Hydruration

- Des précautions sont prises dans la fabrication pour éviter une perte d'intégrité de la gaine par un mécanisme d'hydruration primaire: hydrogène (ou matériau contenant de l'hydrogène) susceptible d'être contenu à l'intérieur du crayon

Crayons combustibles: critères de conception

■ Usure par frottement

- Le dispositif de maintien des crayons dans les grilles (par exemple ressorts et bossettes) ne doit pas entraîner une usure excessive de la gaine susceptible de provoquer une perte d'intégrité du crayon ou de réduire significativement sa capacité à résister aux sollicitations de fonctionnement

■ Contraintes et déformation

- La contrainte ou déformation de la gaine doit rester inférieure à la valeur pour laquelle la perte d'intégrité du crayon est prédite en considérant les effets de la température, de l'irradiation et de la corrosion

■ Fatigue

- Le nombre admissible de cycles de déformation en fatigue doit être significativement supérieur au nombre cumulé des cycles pouvant être subis par le crayon pendant son irradiation (les limites peuvent être basées sur l'amplitude de la contrainte ou sur le nombre de cycles)

■ Flambage circonférentiel de la gaine

- Le crayon doit être conçu de façon telle qu'il n'y ait pas de formation de vides entre pastilles ou que la gaine ne puisse pas s'affaisser sous l'effet du fluage à l'endroit de vides éventuels entre pastilles provoqués par la densification sous irradiation de ces pastilles

Crayons combustibles: critères de conception

■ Contraintes et déformation

- La contrainte ou déformation de la gaine doit rester inférieure à la valeur pour laquelle la perte d'intégrité du crayon est prédite en considérant les effets de la température, de l'irradiation et de la corrosion

■ Fatigue

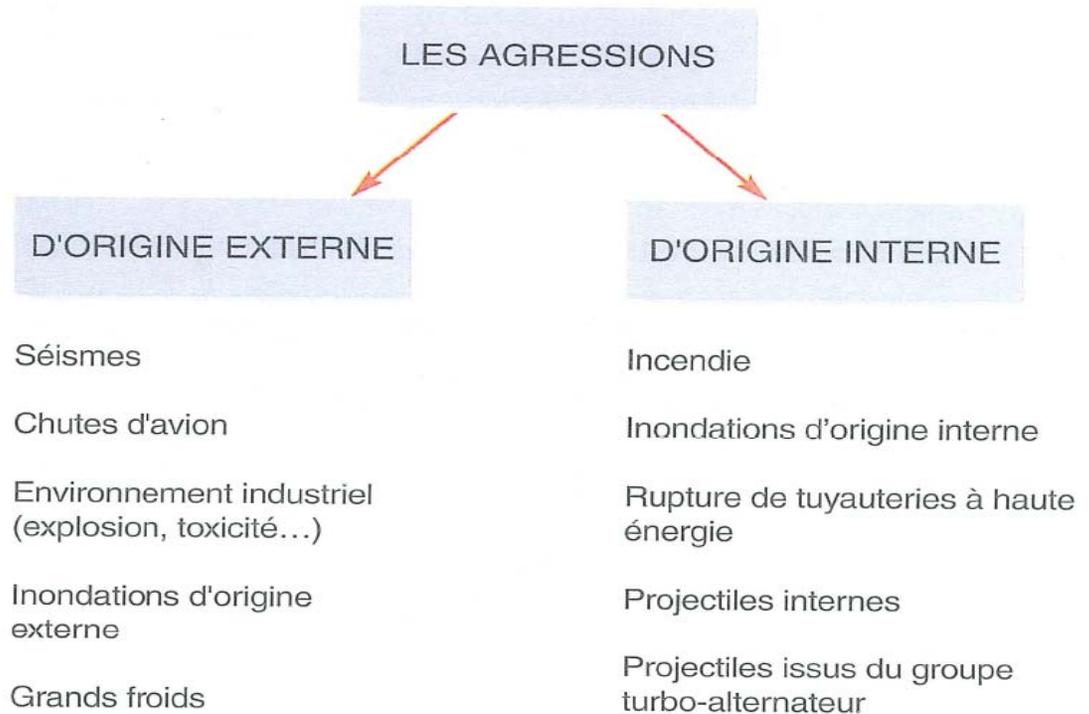
- Le nombre admissible de cycles de déformation en fatigue doit être significativement supérieur au nombre cumulé des cycles pouvant être subis par le crayon pendant son irradiation (les limites peuvent être basées sur l'amplitude de la contrainte ou sur le nombre de cycles)

■ Flambage circonférentiel de la gaine

- Le crayon doit être conçu de façon telle qu'il n'y ait pas de formation de vides entre pastilles ou que la gaine ne puisse pas s'affaisser sous l'effet du fluage à l'endroit de vides éventuels entre pastilles provoqués par la densification sous irradiation de ces pastilles

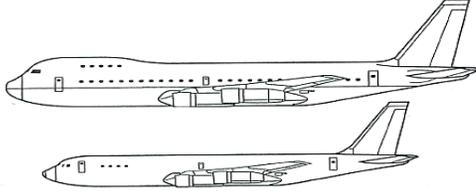
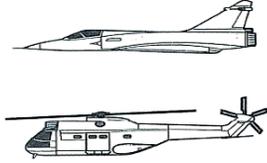
Protection contre les agressions

- Les agressions prises en compte pour le dimensionnement et l'installation de tous les matériels classés IPS



Exemple d'agression externe: chutes d'avion

- La probabilité de dégagement de substances radioactives à la suite de la chute d'un avion sur les systèmes et matériels qui concourent aux trois fonctions e sûreté doit être inférieure à 10^{-7} par an, par tranche et par fonction de sûreté
- Par conséquent, seul le risque de chute d'avions de l'aviation générale a été retenu

Commercial Vols/an: 700 000	Probabilité d'accident par vol	Probabilité d'impact/an par tranche et par fonction de sûreté (évaluations pessimistes)
	$< 10^{-6}$	$< 10^{-8}$
Militaire Vols/an: 500 000 	$\approx 10^{-5}$	$\approx 10^{-7}$
Générale Vols/an: 2 000 000 LEARJET 23  CESSNA 210 	$\approx 10^{-4}$	Quelques 10^{-6} d'où nécessité de protections particulières

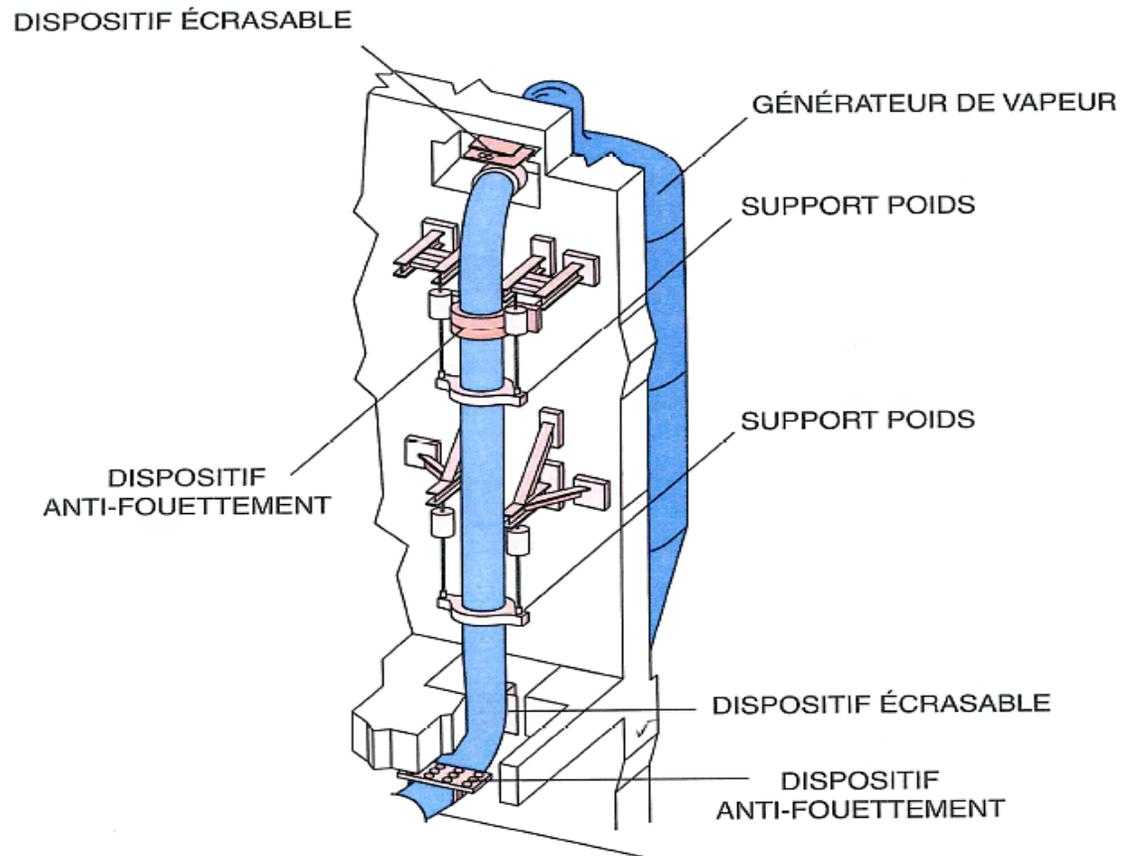
Exemple d'agression interne: rupture de tuyauterie à haute énergie (>20 bar et >100°C)

■ Les conséquences d'une rupture de tuyauterie sont

- Effet de l'écoulement: jet, inondation, irradiation et contamination
- Modification des conditions locales (pression, température, humidité etc.)
- Effet dynamique de la tuyauterie rompue: fouettement

■ Critères de conception:

- Rupture d'une boucle primaire ne doit pas entraîner la rupture d'une autre boucle
- Le circuit primaire ne doit pas se rompre à la suite d'une rupture de tuyauterie secondaire
- Une rupture qui n'entraîne pas un APRP ne doit pas provoquer un accident ayant pour conséquence un APRP, etc.



Ligne vapeur VVP sortie GV

Exemple d'agression interne: projectiles internes

- Susceptibles d'être émis à l'intérieur du bâtiment réacteur
- Projectiles potentiels:
 - Mécanisme de commande des grappes
 - Doigts de gant des capteurs
 - Bouchons de purge d'air, etc.
- Les études portent sur:
 - Trajectoires possibles des projectiles
 - Dégâts occasionnés
 - Protections optimales à interposer

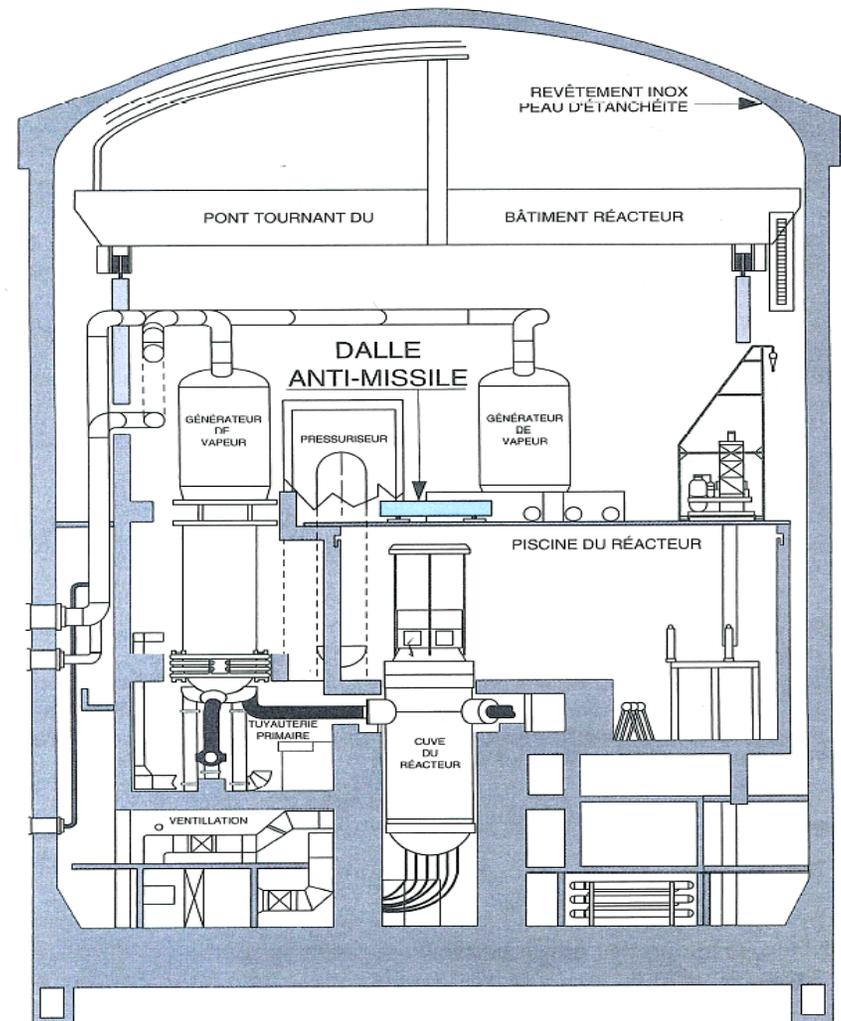


Schéma du bâtiment réacteur CPO (Fessenheim - Bugey)

Approche probabiliste: EPS

- Les Études Probabilistes de Sûreté (EPS) sont utilisés dans le cadre des réexamens de sûreté (domaine complémentaire)
- Les EPS sont utilisés comme contribution à l'élaboration du référentiel d'exploitation

