

Les bases de la technologie des réacteurs

Dr Ralf Guldner

***Framatome ANP Regional Manager
Région Allemagne***

AREVA Technical Days

Chalon, 2&3 juillet 2003

▶ **Comment fonctionne un réacteur ?**

◆ *Principes de fonctionnement*

◆ *La gestion du cœur par l'exploitant*

▶ **Comment un réacteur est-il conçu ?**

◆ *Aspects mécaniques et matériaux*

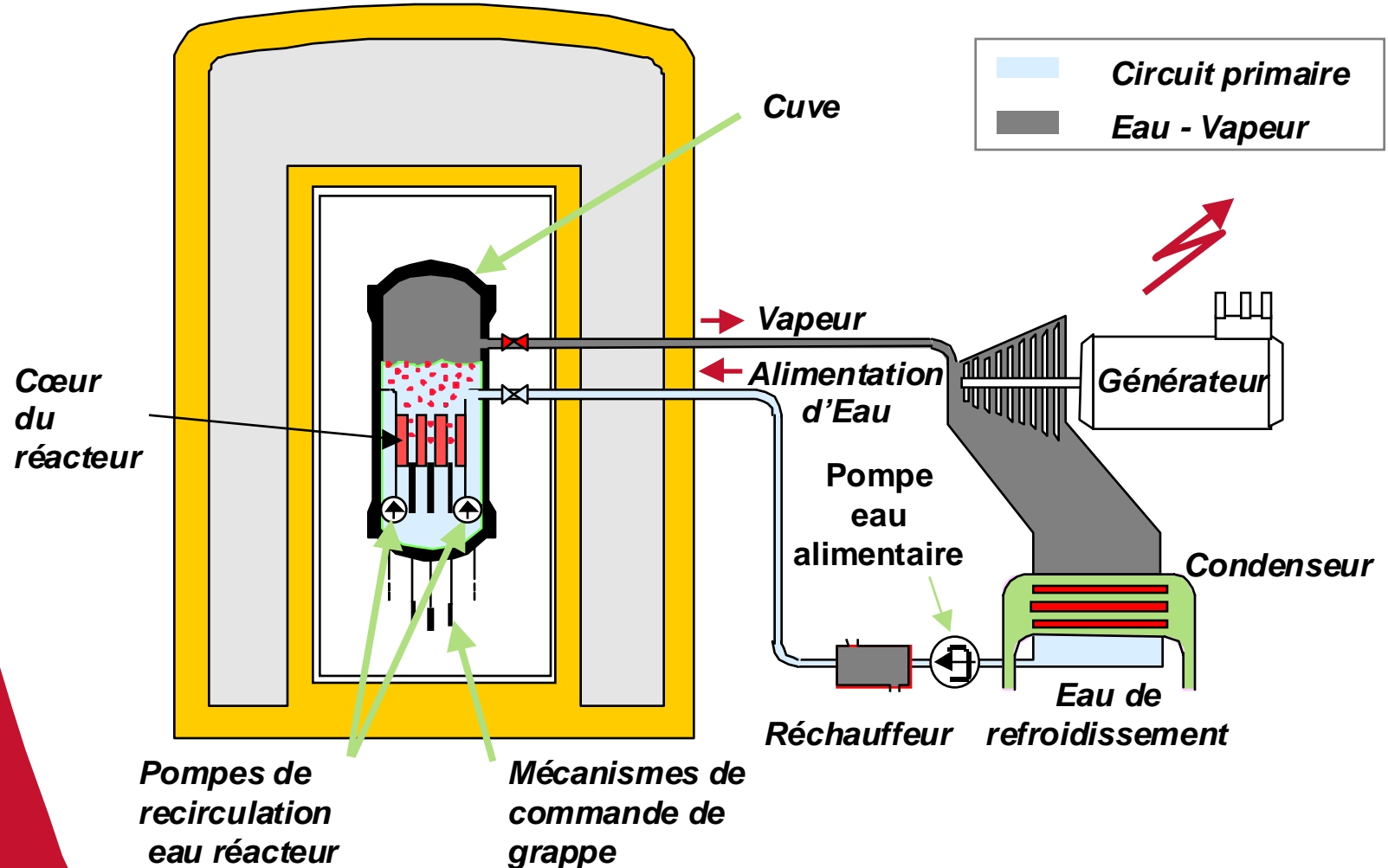
◆ *Aspects neutroniques et thermo-hydrauliques*

◆ *Instrumentation et Contrôle (I&C)*

◆ *Sûreté*

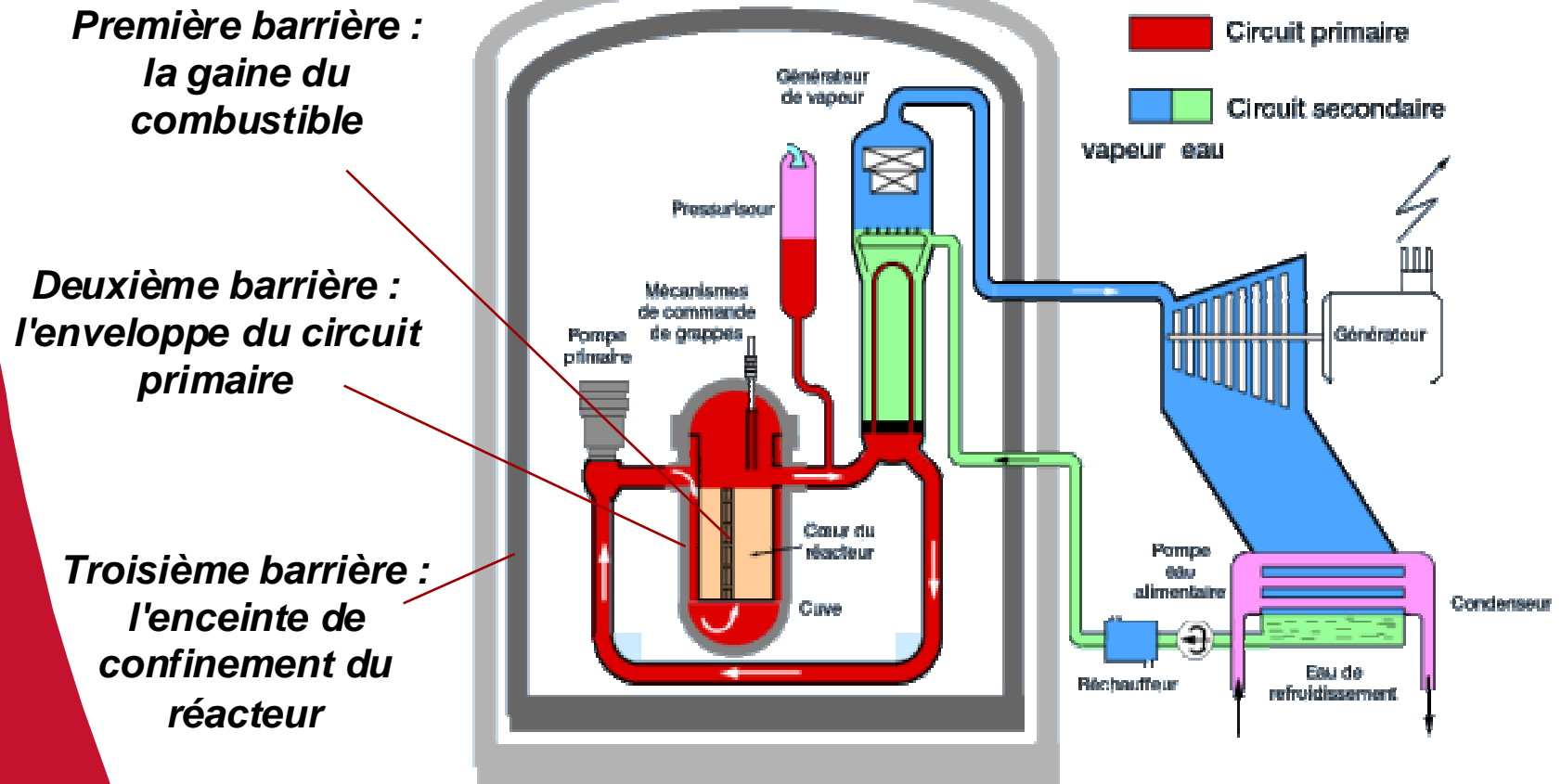
Les réacteurs nucléaires à eau légère sont des systèmes complexes utilisant l'énergie nucléaire pour chauffer de l'eau

► Exemple : Réacteurs à Eau Bouillante (REB)



Les réacteurs nucléaires à eau légère sont des systèmes complexes utilisant l'énergie nucléaire pour chauffer de l'eau

► Exemple : Réacteur à Eau Pressurisée (REP)

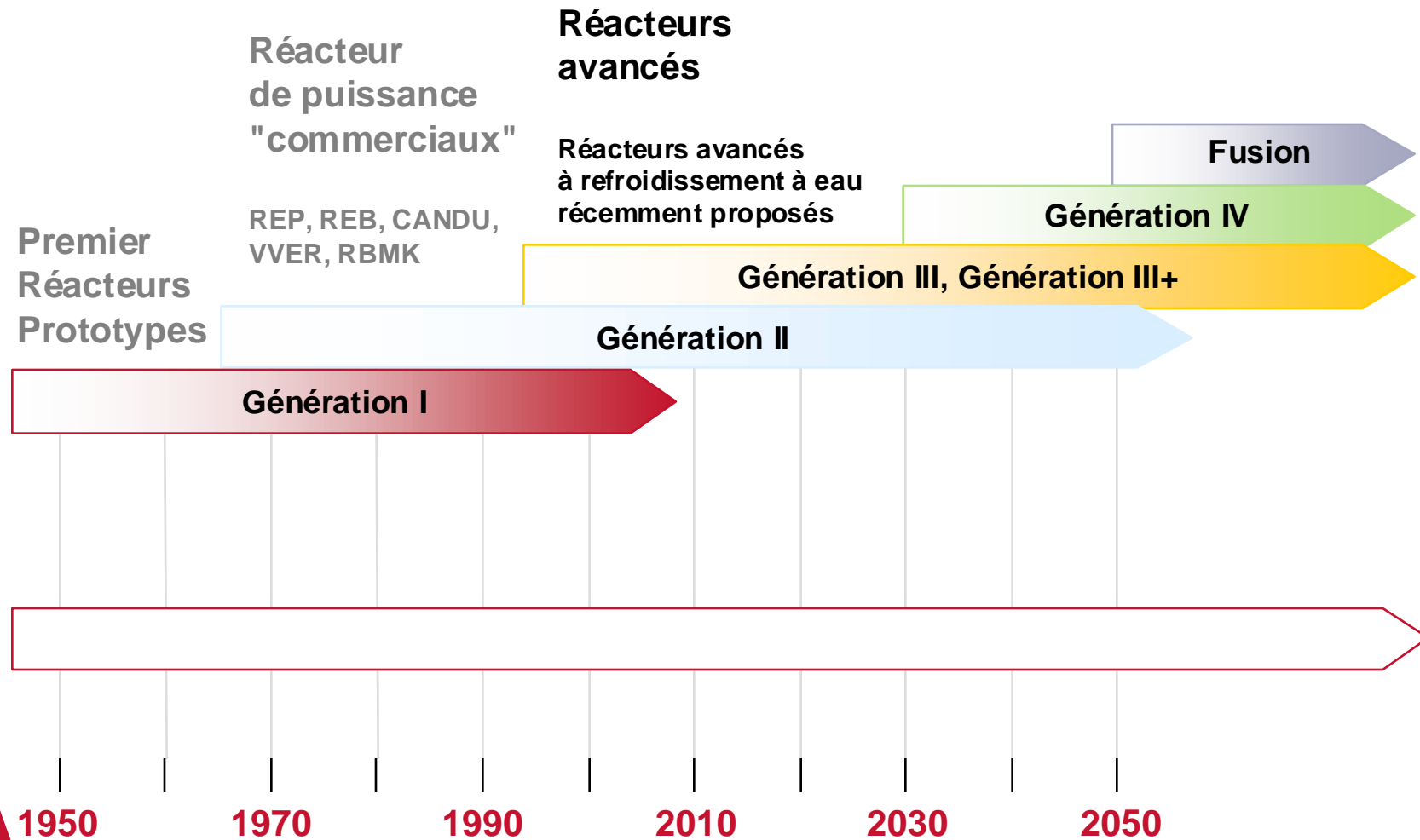


Les réacteurs PWR ont une densité de cœur supérieure à celle des REB

		EPR (REP)*	SWR (REB)*
Puissance thermique	MW	4250/4500	3370
Puissance nette en sortie	MW	1500/1600	1250
Pression du réacteur	bar	155	75
Température moyenne du cœur	°C	313	290
Hauteur de la cuve	m	12,7	23,8
Diamètre du cœur	m	3,8	5,3
Longueur du cœur	m	4,2	3
Densité de puissance du cœur	MW/m ³	89,3	51
Assemblages de combustible	nb	241	664
Quantité de métal lourd dans le cœur	t	130,9	136,3
Mécanismes de contrôle	nb	89	157

* Valeurs typiques

La succession des "Génération" de réacteurs



ICONE 2003

Le modérateur, le fluide de refroidissement et le type de combustible sont les paramètres principaux de la définition d'un réacteur

Type de réacteur	Modérateur	Fluide de refroidissement	Combustible de référence
REP & VVER	Eau légère	Eau légère	UO ₂ enrichi (jusqu'à 5 %)
REB	Eau légère	Eau légère	UO ₂ enrichi (jusqu'à 5 %)
CANDU*	Eau lourde	Eau lourde ou légère	UO ₂ naturel (ou faiblement enrichi)
AGR*	Graphite	Dioxyde de carbone	UO ₂ enrichi
HTR & VHTR	Graphite	Hélium	UO ₂ enrichi (particules revêtues)
Réacteurs rapides à métal liquide	Pas de modérateur	Métal liquide (sodium)	PuO ₂ (fissile) UO ₂ (fertile)
Réacteurs rapides à refroidissement au gaz (dans le futur)	Pas de modérateur	Hélium	Pu,U... (métal, oxyde, carbure ...)

** L'arrêt du réacteur n'est pas nécessaire pour le chargement / déchargement du combustible*

Les réacteurs à eau légère (REL) représentent presque 80% des 446 réacteurs installés dans le monde

<i>Type de réacteurs</i>	Nombre d'unités en exploitation à fin 2001	
REP	209	
REB	92	
VVER	51	
<i>Sous-total REL</i>	352	~80%
Réacteurs à eau lourde (CANDU & autres)	38	
MAGNOX	18	
RBMK	17	
AGR	14	
FBR	4	
Autres	3	
<i>Total</i>	446	

▶ **Comment fonctionne un réacteur ?**

- ◆ *Principes de fonctionnement*
- ◆ *La gestion du cœur par l'exploitant*

▶ **Comment un réacteur est-il conçu ?**

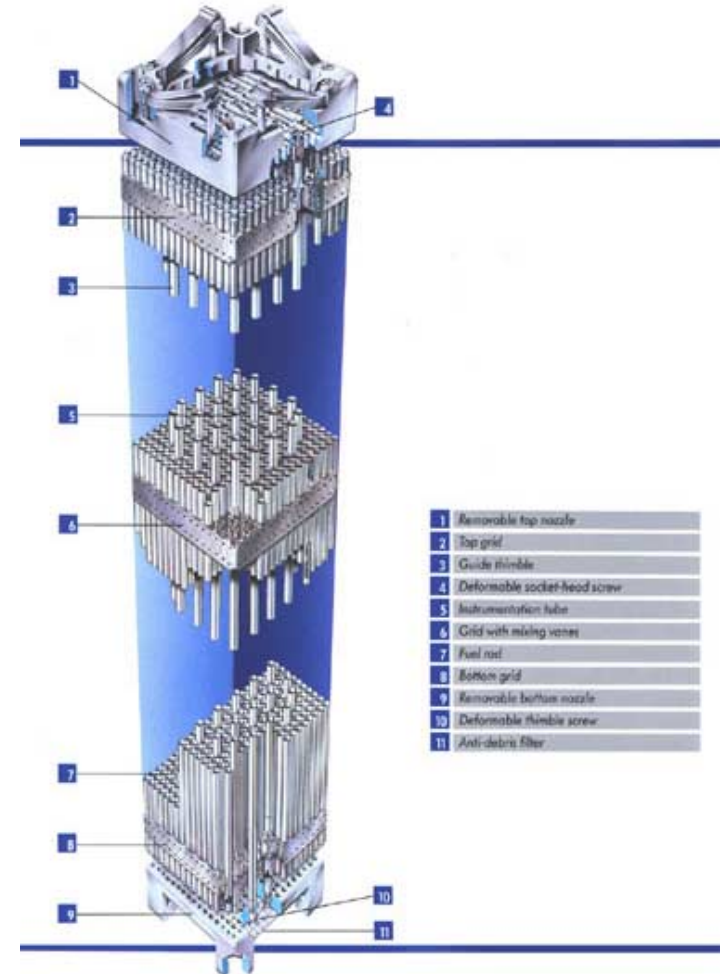
- ◆ *Aspects mécaniques et matériaux*
- ◆ *Aspects neutroniques et thermo-hydrauliques*
- ◆ *Instrumentation et Contrôle (I&C)*
- ◆ *Sûreté*

Les assemblages de combustible REB et REP sont de conception similaire et ils constituent la 1^{ère} barrière physique de confinement des radio-nucléides

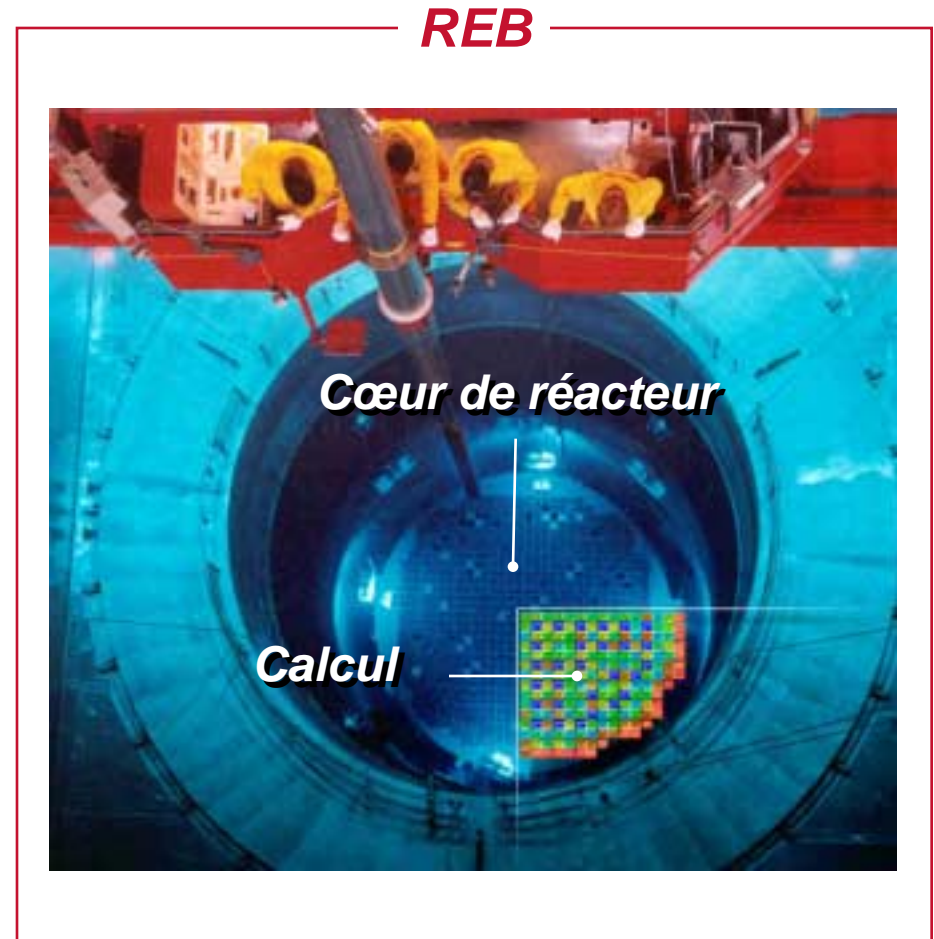
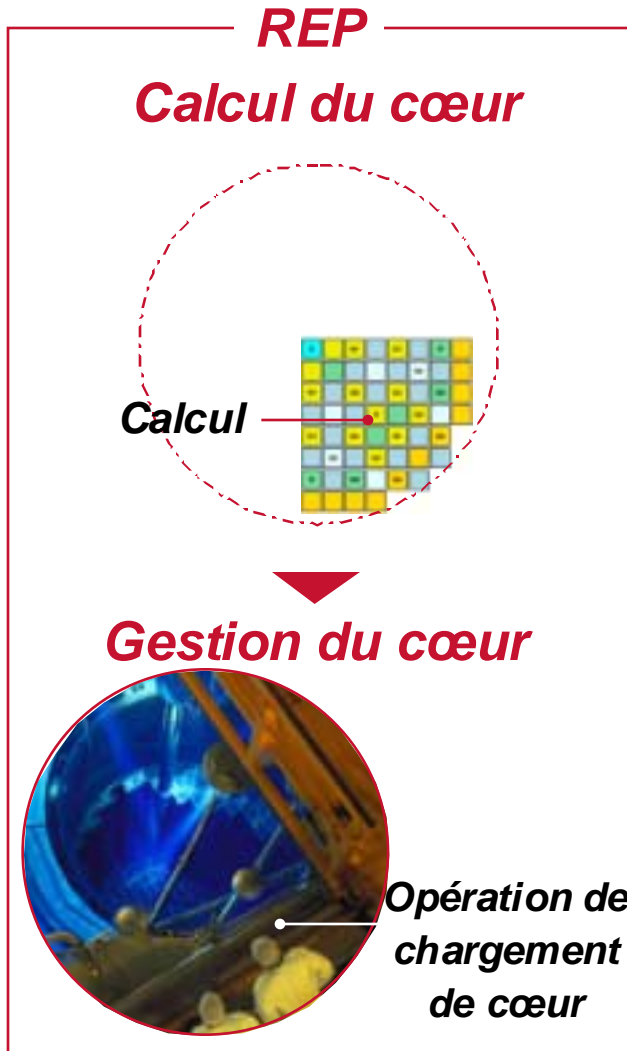
Assemblage REB



Assemblage REP



La gestion de cœurs REB et REP nécessite les mêmes compétences spécifiques, partagées entre l'ingénierie et l'exploitant



La gestion du cœur est de la responsabilité de l'exploitant, avec le support de l'ingénierie

- ▶ ***Optimisation du coût de production : disponibilité du réacteur vs coût du cycle***
- ▶ ***La conception du combustible contribue de façon significative à l'amélioration de l'efficacité du réacteur***
- ▶ ***Le combustible séjourne typiquement 12 à 24 mois en réacteur***
- ▶ ***Les rechargements se font en général par 1/4, 1/3 ou 1/2 cœur, mais tous les assemblages du cœur sont redistribués lors de ces opérations***

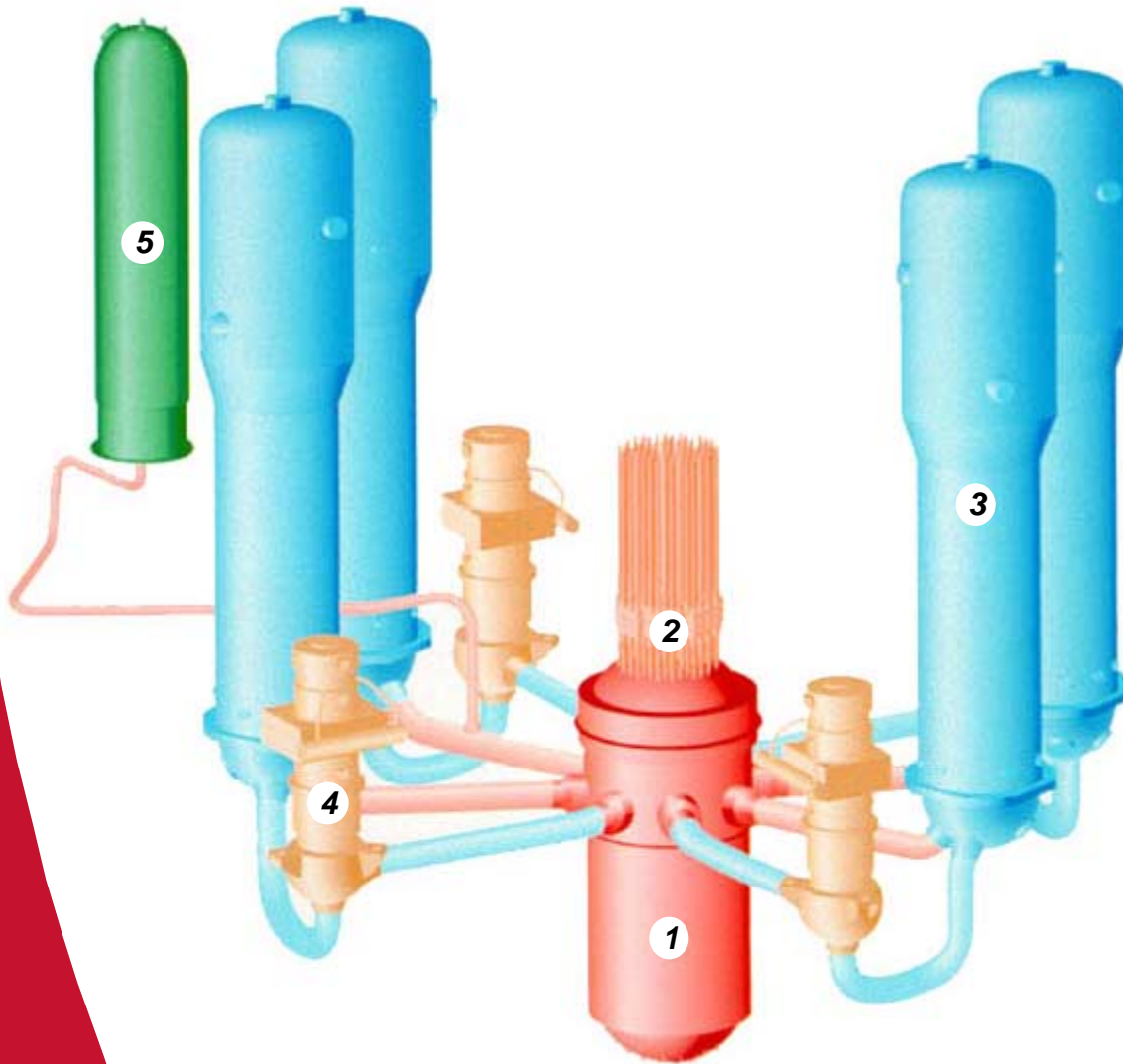
- ▶ **Comment fonctionne un réacteur ?**
 - ◆ *Principes de fonctionnement*
 - ◆ *La gestion du cœur par l'exploitant*

- ▶ **Comment un réacteur est-il conçu ?**
 - ◆ **Aspects mécaniques et matériaux**
 - ◆ *Aspects neutroniques et thermo-hydrauliques*
 - ◆ *Instrumentation et Contrôle (I&C)*
 - ◆ *Sûreté*

La conception d'un réacteur doit répondre à une déclinaison de contraintes

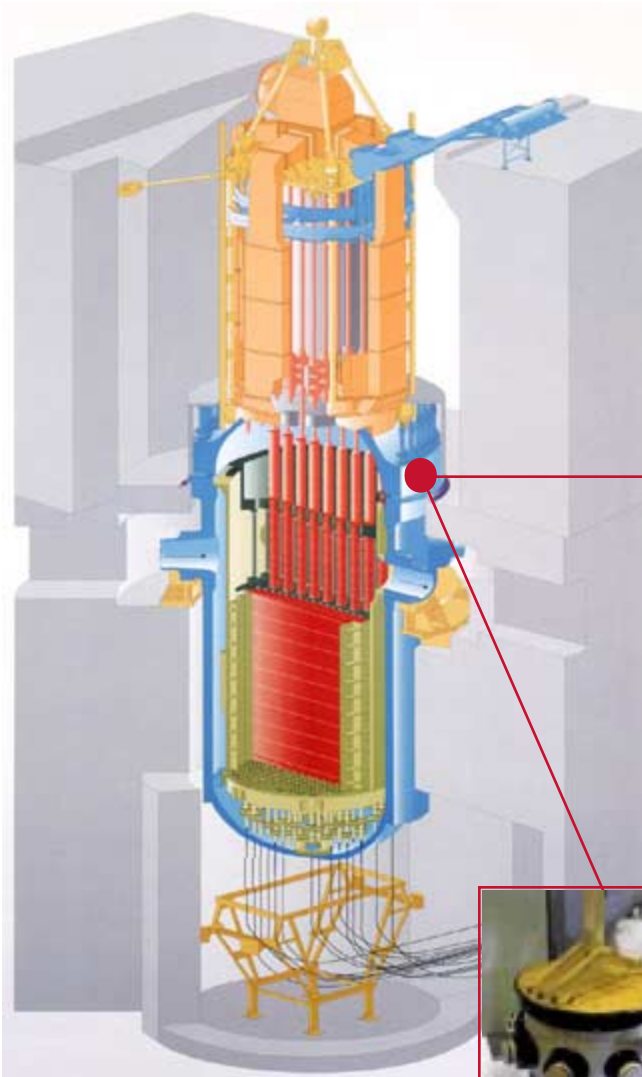
- ▶ ***Les attentes et besoins des clients
(exemple : utilités européennes et exigences de l'Institut de Recherche de l'Energie Electrique - US)***
- ▶ ***Objectifs technico-économiques spécifiques à chaque projet***
- ▶ ***Respect des règles de sûreté en conditions normales, transitoires, et en conditions d'accident hypothétique***
- ▶ ***Améliorations issues de la conception, de la construction et de l'exploitation des modèles précédents***
- ▶ ***Normes et Codes de conception nationaux et internationaux***

La boucle primaire d'un réacteur REP et ses principaux composants



- ① Cuve de réacteur
- ② Mécanismes de commande des grappes de contrôle
- ③ Générateur de vapeur
- ④ Pompe de refroidissement du réacteur
- ⑤ Pressuriseur

La cuve de réacteur REP (et ses équipements)



FONCTIONS

- ▶ Contenir le cœur du réacteur et les structures associées
- ▶ Résister aux hautes pressions (155b) de l'eau en circulation (env. 300° C)

CONTRAINTES

- ▶ Pression et températures nominales et cyclages associés
- ▶ Irradiation neutronique

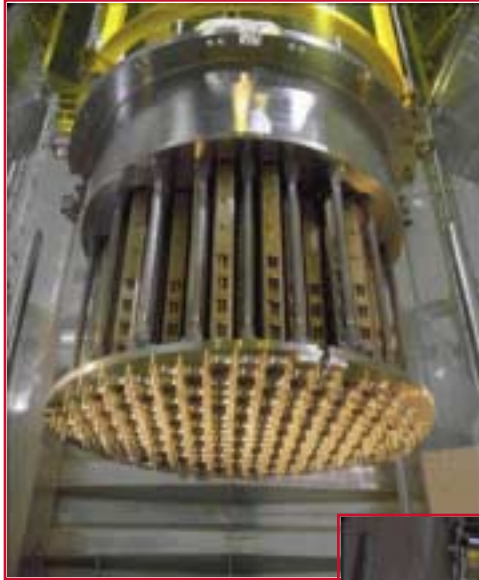
MATERIAUX

- ▶ Alliage d'acier bas carbone avec revêtement interne en acier inoxydable

DIMENSIONS ET POIDS

- ▶ Hauteur : 12 à 13 mètres
- ▶ Diamètre interne : 4 à 4,5 m
- ▶ Epaisseur : 13 à 20 cm
- ▶ Poids : 330 à 460 tonnes

Equipements internes de cuves - REP



FONCTIONS

- ▶ Soutien et maintien latéral des assemblages de combustible
- ▶ Guidage des barres de contrôle et de l'instrumentation interne
- ▶ Distribution du flux de refroidissement à l'intérieur du coeur

CONTRAINTES

- ▶ Effets mécaniques de la circulation du fluide de refroidissement
- ▶ Effets chimiques du fluide de refroidissement
- ▶ Irradiation
- ▶ Températures et cyclage thermique

MATERIAUX

- ▶ Acier inoxydable et alliages de nickel

DIMENSIONS ET POIDS

- ▶ Hauteur : 12 à 13 mètres
- ▶ Diamètre : 4 à 4,5 m
- ▶ Poids : 160 à 230 tonnes

Générateur de Vapeur (GV) - REP

Conception



Installation



**Surface d'échange
thermique :
4 700 à 7 000 m²**

FONCTIONS

- ▶ Transférer la chaleur et assurer l'étanchéité entre le circuit primaire et le circuit secondaire

CONTRAINTES

- ▶ Effets mécaniques des flux en circulation dans les circuits primaire et secondaire
- ▶ Effets chimiques des fluides du circuit primaire et du circuit secondaire
- ▶ Température et pression, et cyclages associés dans les circuits primaire et secondaire

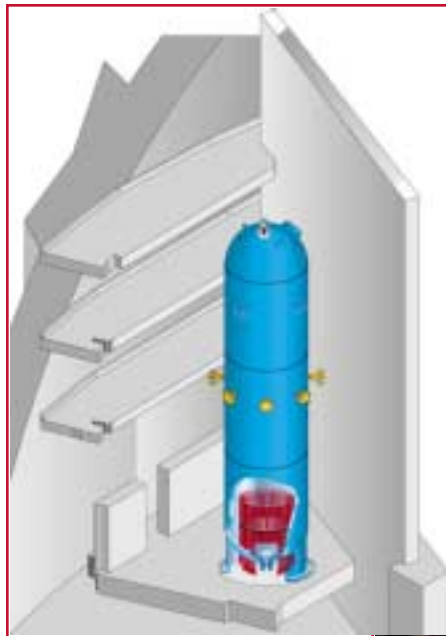
MATERIAUX

- ▶ Alliages de nickel (tubes)
Alliages d'acier bas carbone (structures),
avec revêtement interne en acier inoxydable
dans la chambre à eau (côté circuit primaire)

DIMENSIONS ET POIDS

- ▶ Hauteur : 20 à 22 mètres
- ▶ Diamètre : 3,5 à 5 m
- ▶ Poids : 300 à 420 tonnes

Conception



Installation



FONCTIONS

- ▶ Maintenir la pression constante dans le circuit de refroidissement

CONTRAINTES

- ▶ Température et pression, et cyclages associés
- ▶ Effets chimiques du fluide de circuit primaire

MATERIAUX

- ▶ Alliage d'acier bas carbone

DIMENSIONS ET POIDS

- ▶ Hauteur : 13 mètres
- ▶ Diamètre : 2,5 à 3 m
- ▶ Poids à vide : 70 à 120 tonnes

- ▶ **Comment fonctionne un réacteur ?**
 - ◆ *Principes de fonctionnement*
 - ◆ *La gestion du cœur par l'exploitant*

- ▶ **Comment un réacteur est-il conçu ?**
 - ◆ *Aspects mécaniques et matériaux*
 - ◆ *Aspects neutroniques et thermo-hydrauliques*
 - ◆ *Instrumentation et Contrôle (I&C)*
 - ◆ *Sûreté*

La conception du cœur : la clef de voûte d'une production sûre d'énergie minimisant la consommation de combustible

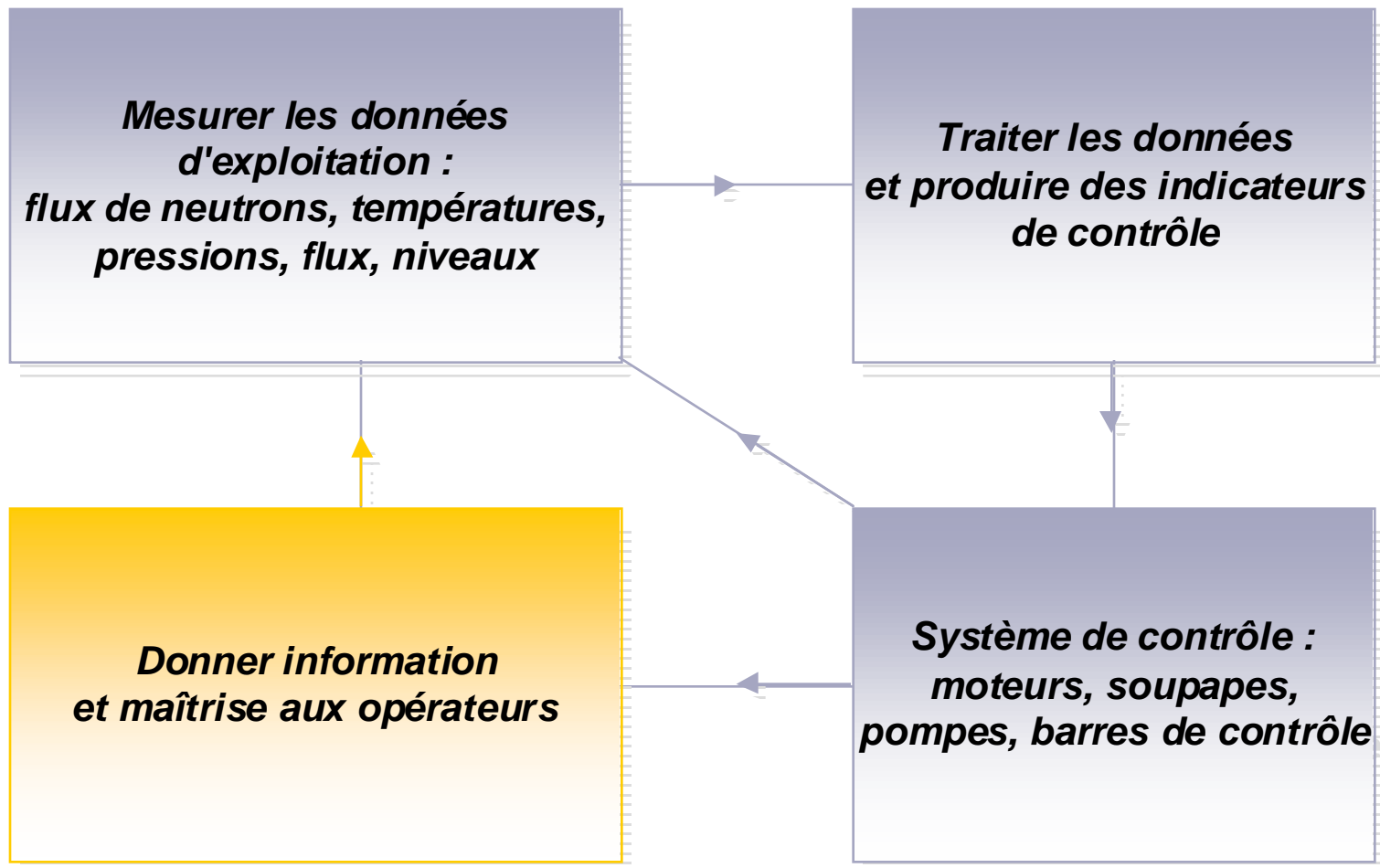
- ▶ ***Nécessite l'optimisation de paramètres interactifs multiples (diamètre des crayons de combustible, ratio combustible / modérateur, nombre d'assemblages, taille du cœur,...)***
- ▶ ***Exige la maîtrise de codes de calcul sophistiqués couvrant les aspects neutroniques, thermo-hydrauliques et mécaniques***
- ▶ ***Les codes de calcul doivent être qualifiés sur la base d'expériences, et approuvés par les autorités de sûreté. Ils doivent être mis à jour en continu sur la base du retour d'expérience d'exploitation***

AREVA possède et entretient un ensemble de codes de calcul qualifiés, à la pointe de la technologie de conception des réacteurs

- ▶ **Comment fonctionne un réacteur ?**
 - ◆ *Principes de fonctionnement*
 - ◆ *La gestion du cœur par l'exploitant*

- ▶ **Comment un réacteur est-il conçu ?**
 - ◆ *Aspects mécaniques et matériaux*
 - ◆ *Aspects neutroniques et thermo-hydrauliques*
 - ◆ **Instrumentation et Contrôle (I&C)**
 - ◆ *Sûreté*

Instrumentation et Contrôle : de la physique à l'exploitation en toute sûreté



Trois principaux Systèmes d'I&C

- ▶ ***Systèmes automatiques de process :***
pour contrôler les fonctions standard
- ▶ ***Systèmes automatiques de sûreté :***
pour assurer la protection du cœur et maintenir les fonctions de sûreté en conditions normales et accidentelles
- ▶ ***Systèmes d'interface homme / machine :***
salle de conduite et autres centres de contrôle

L'I&C fait partie intégrante de la valeur ajoutée d'ingénierie

Principaux Systèmes d'I&C

Salle de conduite principale



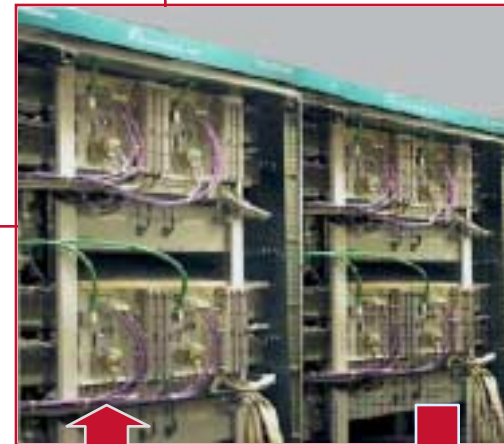
Systèmes automatiques de process



↑
Capteurs

↓
Actuateurs

Systèmes automatiques de sûreté



↑
**Capteurs
DéTECTEURS
neutroniques**

↓
Actuateurs

- ▶ **Comment fonctionne un réacteur ?**
 - ◆ *Principes de fonctionnement*
 - ◆ *La gestion du cœur par l'exploitant*

- ▶ **Comment un réacteur est-il conçu ?**
 - ◆ *Aspects mécaniques et matériaux*
 - ◆ *Aspects neutroniques et thermo-hydrauliques*
 - ◆ *Instrumentation et Contrôle (I&C)*
 - ◆ **Sûreté**

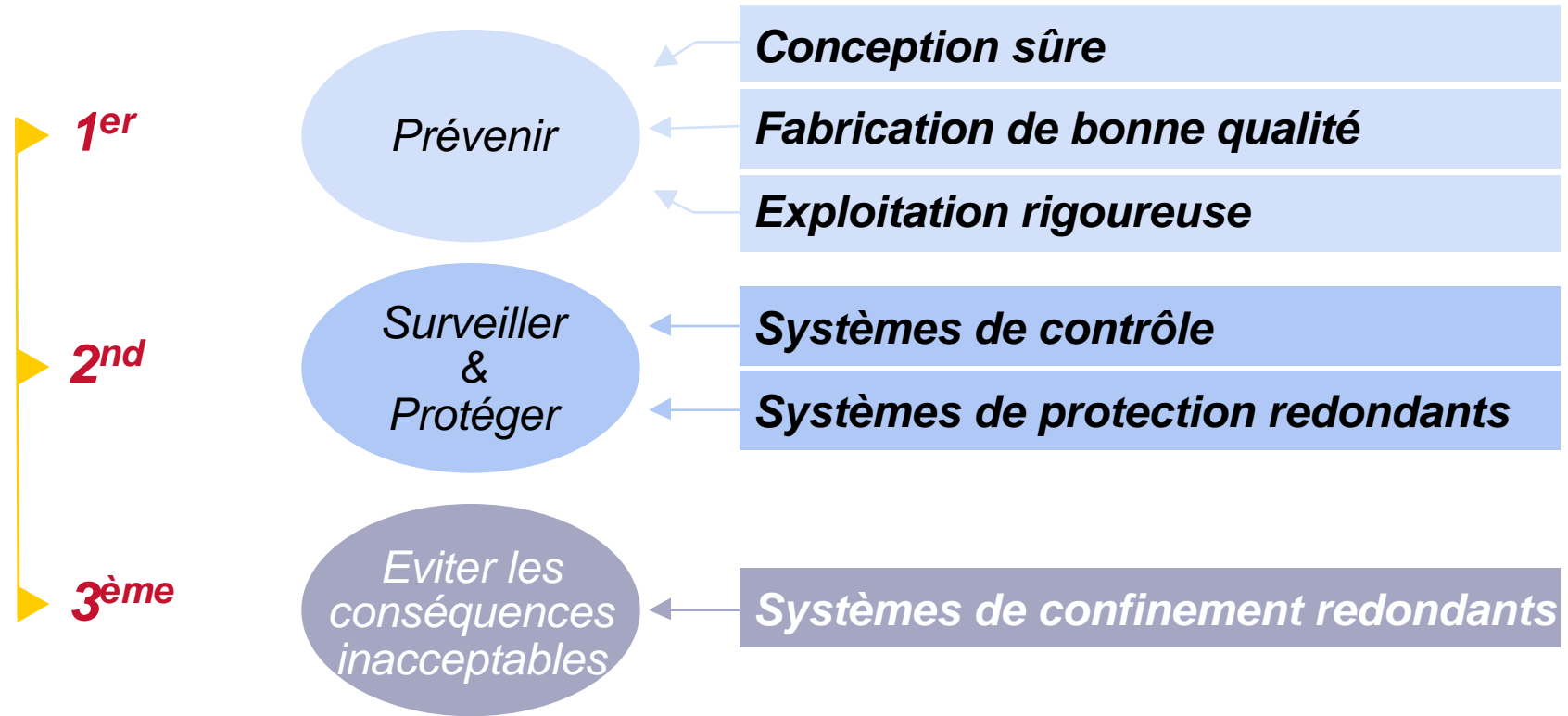
Par rapport aux centrales conventionnelles, deux points spécifiques au nucléaire doivent être maîtrisés

- ▶ ***Eviter en toutes circonstances la sur-criticité***
- ▶ ***Assurer l'évacuation de la chaleur résiduelle,
même en conditions accidentelles***

Trois fonctions de sûreté doivent être maintenues en toutes circonstances

- ▶ ***Gestion de la réaction en chaîne***
- ▶ ***Refroidissement du combustible et évacuation de la chaleur y compris après l'arrêt de la réaction en chaîne***
- ▶ ***Confinement des produits radioactifs***

La sûreté des réacteurs nucléaires est basée sur le concept des trois niveaux de "défense en profondeur"



En complément, mise en place des moyens minimisant les conséquences d'accidents sévères, de probabilité extrêmement faible car supposant le non-fonctionnement de tous les systèmes préventifs de sûreté

La "conception sûre" repose sur le principe des trois barrières de confinement

- ▶ ***Une série de barrières physiques résistantes et étanches formant une protection contre les rayonnements et confinant la radioactivité en toutes circonstances***
 - ◆ ***La gaine des crayons de combustible***
 - ◆ ***L'enveloppe du circuit primaire***
 - ◆ ***L'enceinte de confinement du réacteur***

L'analyse de sûreté : un point clef de la conception du réacteur

- ▶ ***Une partie essentielle du travail de conception***
- ▶ ***Une coopération étroite concepteur / exploitant pour justifier la sûreté, l'exploitant étant responsable devant l'autorité de sûreté***
- ▶ ***Du point de vue de la sûreté, le fonctionnement correct du réacteur est à démontrer en conditions normales (états stable et transitoire) d'exploitation, et sous l'hypothèse d'événements incidentels et accidentels***
- ▶ ***L'analyse de sûreté doit démontrer le respect, en toutes circonstances, des conséquences radiologiques maximales acceptables fixées par les autorités de sûreté***

Quelques exemples de situations ou événements à analyser pour justifier la sûreté

- ▶ **Transitoires d'exploitation (fréquents ou réguliers)**
 - ◆ **Montée et descente en température : passage état chaud / état froid**
 - ◆ **Changements de niveaux de puissance**
- ▶ **Incidents d'exploitation (10^{-2} à 1)***
 - ◆ **Dysfonctionnement du système d'alimentation en eau des Générateurs de Vapeur**
 - ◆ **Dilution de bore non contrôlée**
- ▶ **Accidents non-fréquents (10^{-4} à 10^{-2})***
 - ◆ **Accident de perte de réfrigérant primaire sur petite brèche**
 - ◆ **Retrait de barre de contrôle à pleine puissance**
- ▶ **Accidents hypothétiques (10^{-6} à 10^{-4})***
 - ◆ **Accident de perte de réfrigérant primaire sur large brèche**
 - ◆ **Ejection de barre de contrôle**

* *Ordre de grandeur de la fréquence par réacteur et par an*

Illustration des aspects Sûreté & Coopération entre l'ingénierie et l'exploitant

- ▶ ***Simulateur d'Analyse de Fonctionnement (SAF)
AREVA / Framatome ANP***

- ▶ ***Scenario :***
 - ◆ ***Un violent orage s'abat aux alentours de centrale***
 - ◆ ***Grosses perturbations sur le réseau électrique***
 - ◆ ***Mise en îlotage de la centrale nucléaire***
 - ◆ ***Retour rapide à pleine puissance après rétablissement
des conditions normales***

- ▶ ***In fine, les technologies REB et REP sont proches***
- ▶ ***Les réacteurs actuels sont de la génération III***
- ▶ ***La conception et l'exploitation des réacteurs ont un impact direct sur le coût du MWh***
- ▶ ***Le concepteur et l'exploitante doivent coopérer étroitement***
- ▶ ***La Sûreté avant tout***