



Centrale Energies
Janvier 2017

La durée d'exploitation des centrales nucléaires

Jean-Pierre HUTIN

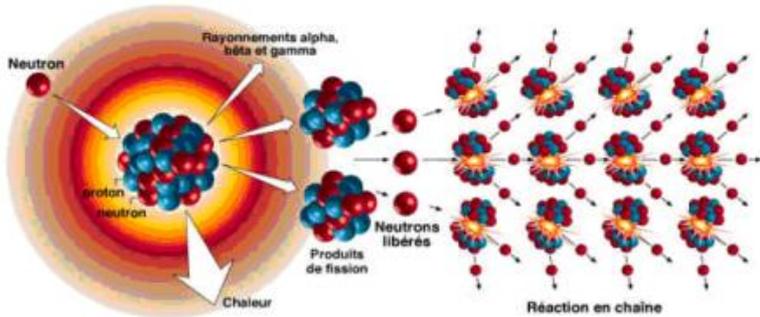
*Ex-directeur technique
du Parc nucléaire EDF*



Une "tranche nucléaire"

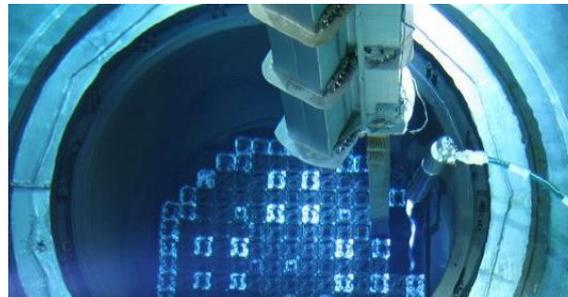
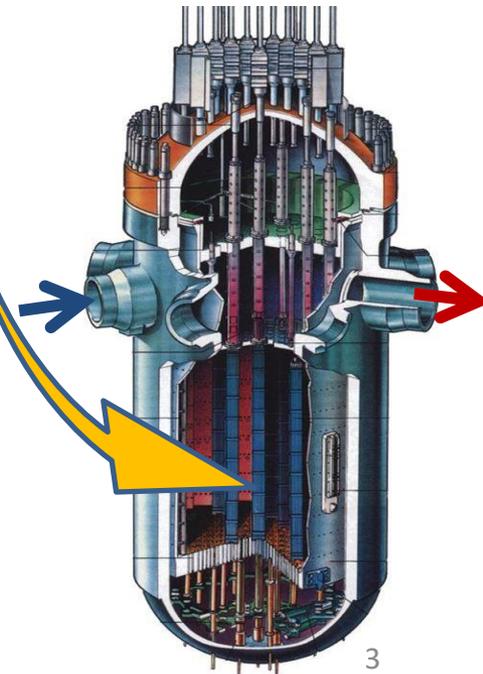
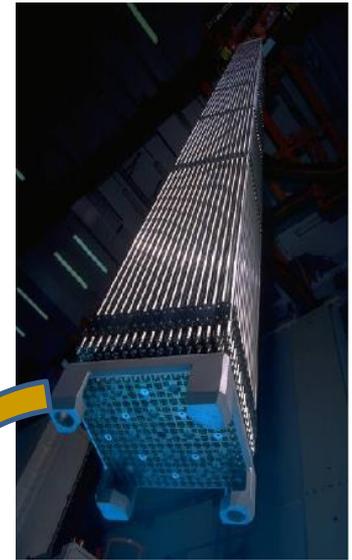
- Une tranche = une installation de production d'électricité autonome
- Sur un site, il peut y en avoir 2, 4 ou 6
- Une tranche comprend
 - Une **partie nucléaire** (le "réacteur" ou la "chaudière") qui utilise la chaleur émise par la réaction nucléaire pour produire de la vapeur
 - Une **partie non-nucléaire** qui utilise la vapeur pour faire tourner une turbine qui entraîne un alternateur qui produit de l'électricité (salle des machines)
 - De très nombreux systèmes et circuits auxiliaires, de secours et de sauvegarde (surtout coté nucléaire)





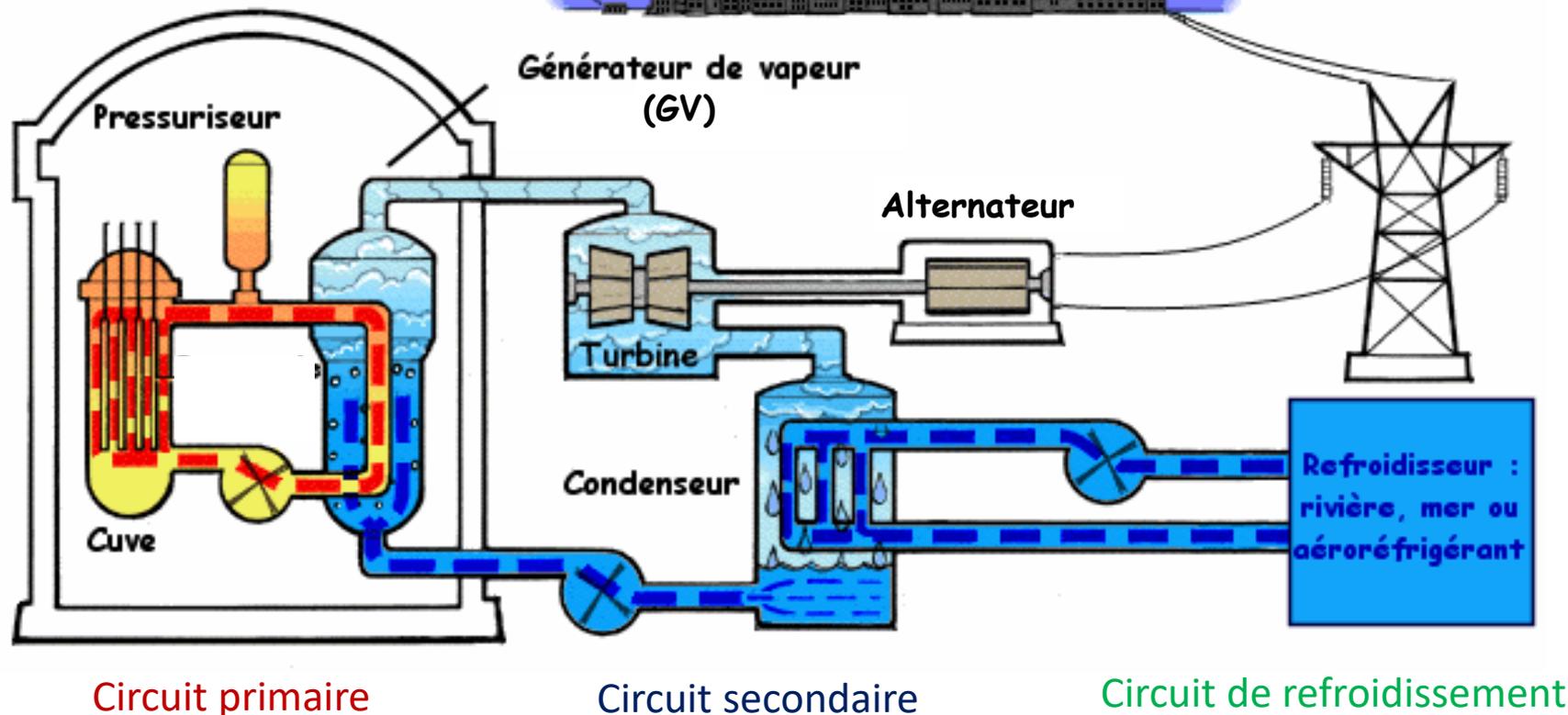
La réaction nucléaire

- Le "combustible" est de l'oxyde d'uranium au sein duquel se passe les réactions nucléaires
 - un neutron frappe un noyau d'Uranium et le casse en deux (fission) en produisant :
 - De la chaleur (que l'on va utiliser)
 - Des neutrons qui eux-mêmes...
- L'oxyde d'uranium est placé dans des tubes (les **crayons**) qui sont assemblés en faisceaux (les **assemblages**) qui sont "entassés" dans la cuve et forment le **coeur** du réacteur



Principe de fonctionnement d'une tranche REP

Bâtiment réacteur
(ou enceinte de confinement)

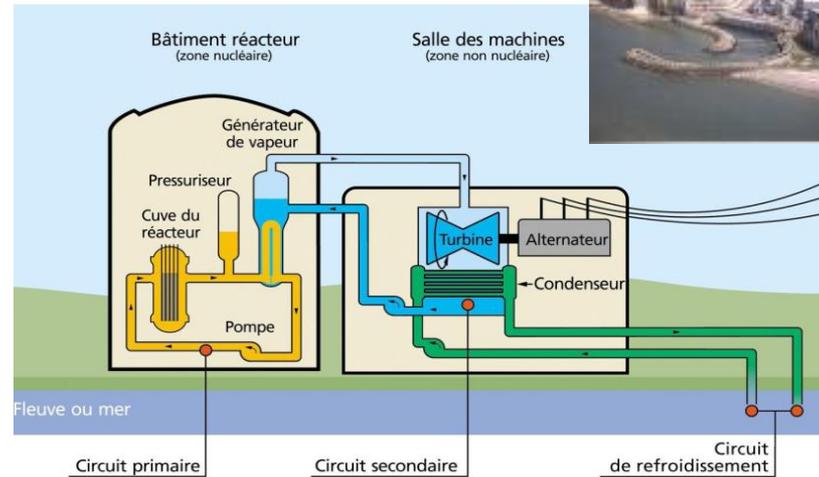


Pour une tranche 900 MW : T° eau primaire entrée cuve : 286°C / sortie cuve : 323°C

Sur une tranche, le circuit de refroidissement peut être "ouvert" ou "fermé"

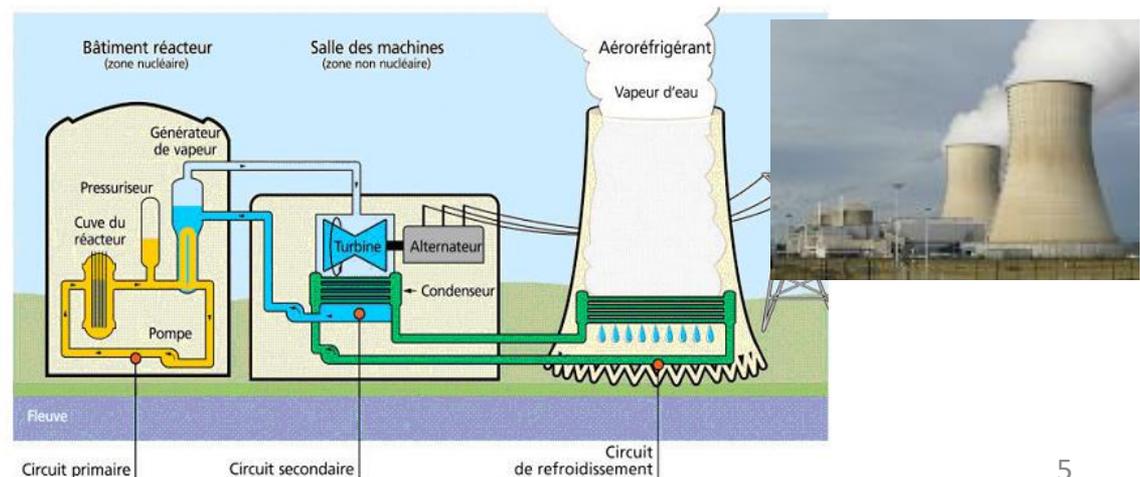
• Circuit ouvert

- Prélèvement - rejet : 50 m³/s
- Eau rejetée plus chaude (quelques degrés sur une centaine de mètres)



• Circuit fermé

- Prélèvement : 2 m³/s



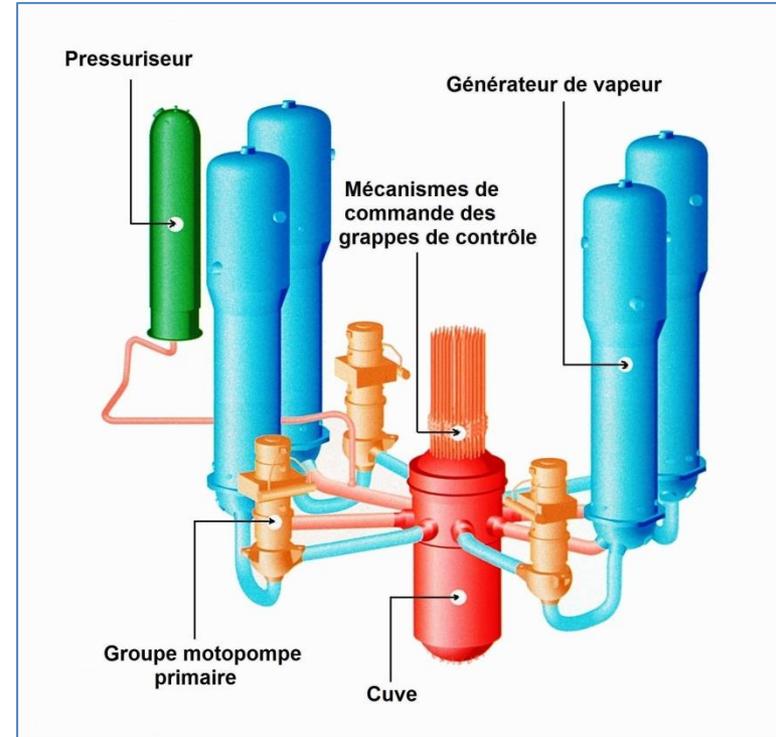
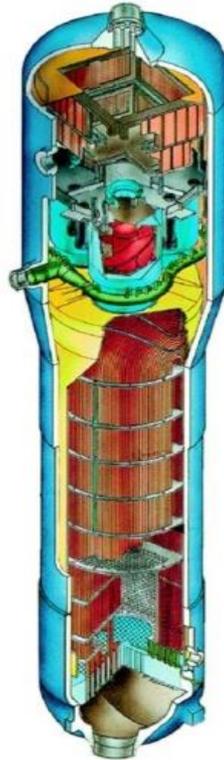
Le site (ou CNPE)



Le circuit primaire



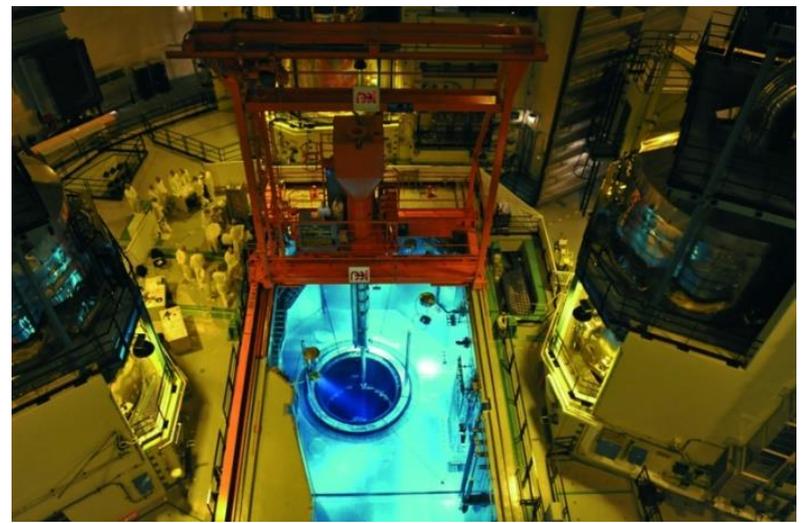
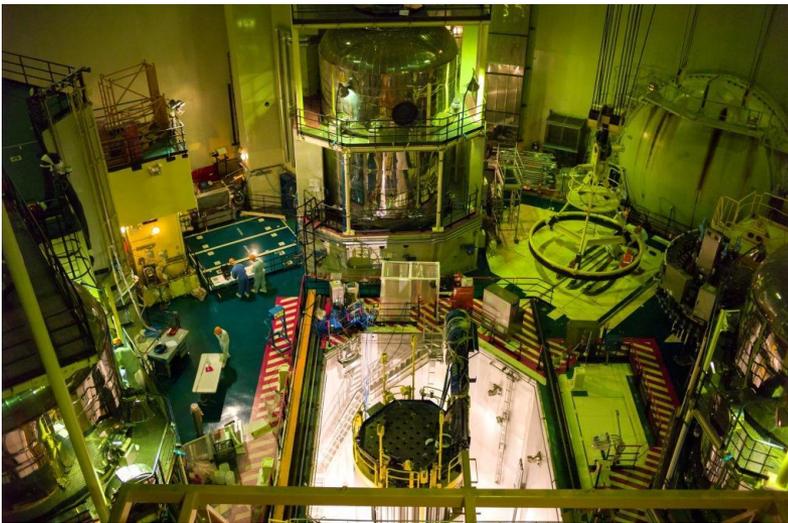
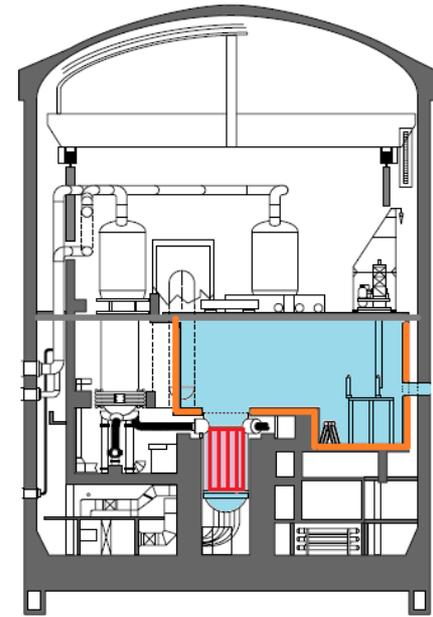
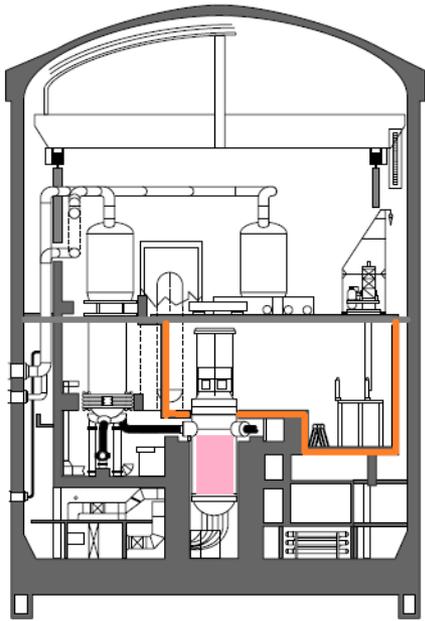
Tranches 900 MWe



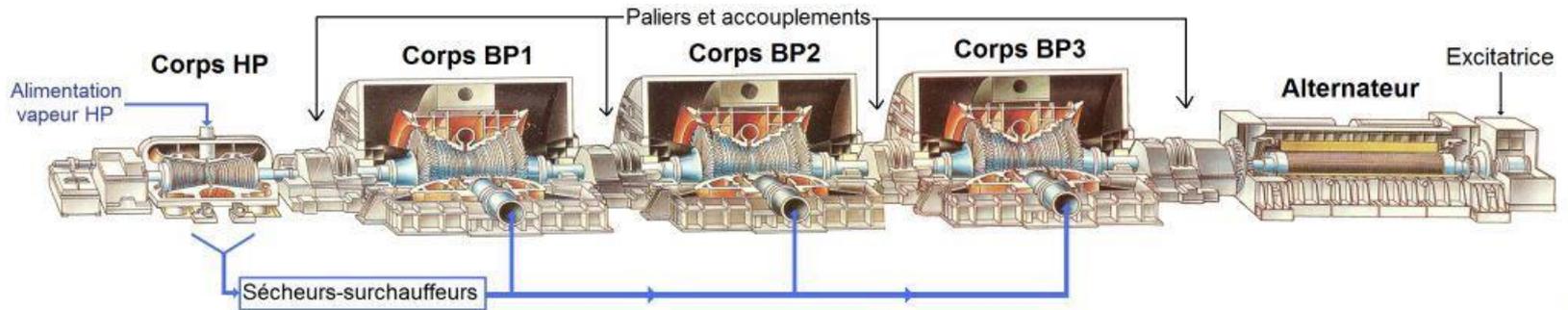
Tranches 1300 et 1450 MWe

... sans oublier les très nombreux circuits auxiliaires, circuits de secours, circuits de sauvegarde connectés au circuit primaire

Dans le Bâtiment Réacteur



Dans la salle des machines



La vie d'une tranche en exploitation

- Une tranche nucléaire est faite pour fonctionner et produire de l'électricité en continu
- Elle doit quand même s'arrêter à intervalles réguliers pour remplacer une partie du combustible (tous les 12 ou 18 mois)
- Quand une tranche fonctionne,
 - il est très difficile de faire de la maintenance
 - Les arrêts "fortuits" (généralement sur avarie) coûtent cher !
- On s'efforce donc de faire toute la maintenance pendant les arrêts programmés pour renouvellement du combustible
- Un arrêt pour renouvellement du combustible et maintenance dure entre 30 et 50 jours
- Tous les 10 ans, on réalise un arrêt beaucoup plus long pour faire des grosses opérations qui demandent du temps

Qu'est-ce qui peut menacer la vie d'une centrale nucléaire ?

- Une limite réglementaire
- La fin de vie technique d'un composant non-remplaçable
- Gros matériels à remplacer en même temps sur de nombreuses tranches = point d'accumulation impossible à gérer (industriellement)
- Des coûts de production prohibitifs (comparé aux moyens alternatifs)
- Absence de soutien industriel (pièces de rechange, par exemple)
- Absence de gens compétents
- Changements des "règles du jeu" (accroissement des exigences)
- Changements dans l'environnement de la centrale (source froide ?)
- Perte de la confiance du public
- Une décision "politique"...

Point de vue réglementaire

- **Aux USA :**

- Une licence accordée au départ pour 30 ou 40 ans
- Possibilité de demander un renouvellement de licence
 - Dossier à fournir démontrant que c'est acceptable
 - méthodes et critères fixés par la NRC à niveau de sûreté constant

- **En France**

- Pas de limite réglementaire fixé à l'origine
- Un processus pour valider, tous les 10 ans, la poursuite de l'exploitation (pour 10 ans de plus)
 - Réexamen de sûreté décennal qui va conduire à des améliorations (niveau de sûreté croissant)

- **Autres pays : soit l'un, soit l'autre**

Qu'est-ce qui peut interrompre la vie d'une centrale nucléaire ?

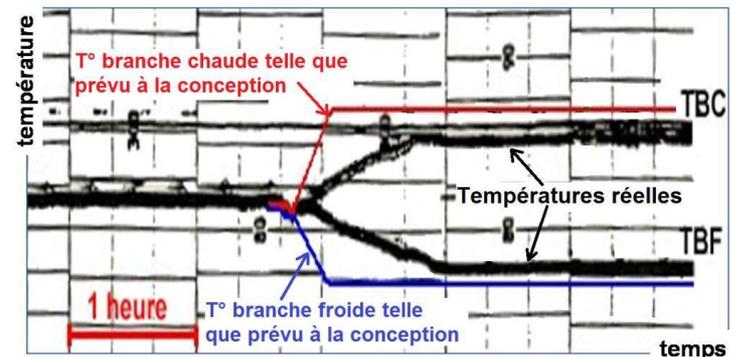
- Une limite réglementaire
- La fin de vie technique d'un composant non-remplaçable
- Gros matériels à remplacer en même temps sur de nombreuses tranches = point d'accumulation impossible à gérer (industriellement)
- Des coûts de production prohibitifs (comparé aux moyens alternatifs)
- Absence de soutien industriel (pièces de rechange, par exemple)
- Absence de gens compétents
- Changements des "règles du jeu" (accroissement des exigences)
- Changements dans l'environnement de la centrale (source froide ?)
- Perte de la confiance du public
- Une décision "politique"...

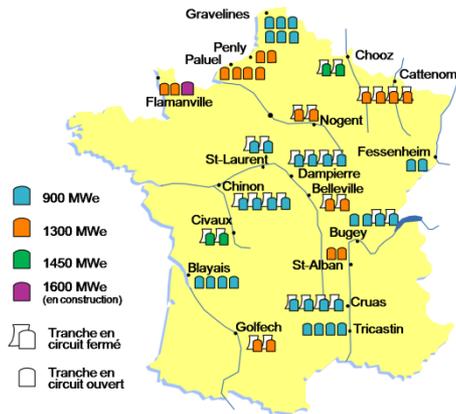
Qu'est-ce qui peut interrompre la vie d'une centrale nucléaire ?

- Une limite réglementaire
- La fin de vie technique d'un composant non-remplaçable
- Gros matériels à remplacer en même temps sur de nombreuses tranches = point d'accumulation impossible à gérer (investissement)
- Des coûts de production élevés (coûts fixes)
- **Durée de vie technico-économique de l'installation :**
 - Durée pendant laquelle on peut exploiter la centrale en toute sécurité et produire de l'électricité à un prix compétitif
 - A la main de l'exploitant (plus ou moins...)
 - Un capital que l'on peut gérer en privilégiant la rentabilité immédiate ou le rendement dans la durée
- Une décision "politique"...

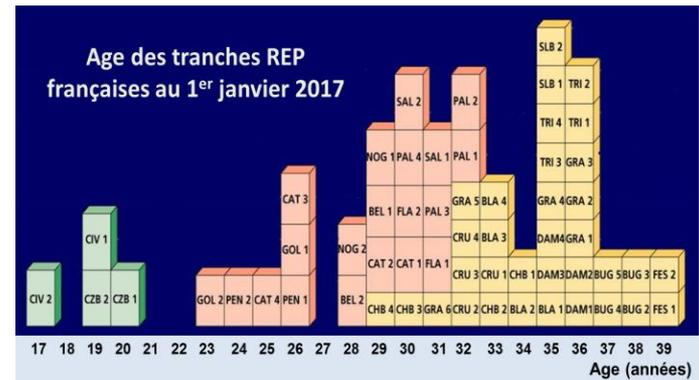
Mais alors d'où vient le chiffre de "40 ans" ?

- Au départ, le concepteur doit montrer que les matériels de la chaudière se comporteront bien pendant toute la durée de vie de la tranche (en tenant compte des différents modes de vieillissement possibles)
- Pour faire cette démonstration (calculs, essais), le concepteur a dû faire des HYPOTHESES sur la façon dont la chaudière serait exploitée et pendant combien de temps
- Hypothèse retenue : 40 ans d'exploitation dans des conditions données...
- Rien n'interdit à l'exploitant de viser plus loin en refaisant les études de conception avec une autre hypothèse : 60 ans
 - Si les études concluent positivement (critères de sûreté respectés) : OK
 - Si les études concluent négativement pour certains matériels, on les remplace
- Mieux : l'exploitant peut conduire l'installation dans des **CONDITIONS** plus "douces" que prévu au départ, ce qui lui permettra un usage plus long
 - ... à condition d'y penser assez tôt !





Comment EDF gère-t-il son "capital" ?



- Politique adoptée dès les années 80 pour gérer et exploiter au mieux le capital que représente la durée de fonctionnement de ses centrales
- Objectif : au moins 60 ans
- Comment ?
 - L'excellence dans l'exploitation et la maintenance au quotidien en intégrant la préoccupation "durée de vie"
 - Une démarche "maintenance exceptionnelle" pour anticiper les gros travaux et éviter les accumulations
 - Des réexamens de sûreté qui, tous les 10 ans, amènent les centrales au meilleur niveau de sûreté
 - Une politique industrielle qui pérennise les supports externes indispensables
 - Une gestion qui garantit le maintien des compétences
 - Un programme technique d'amélioration des connaissances

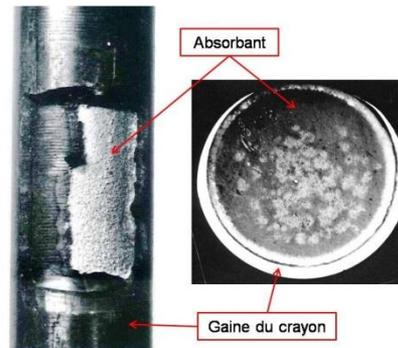
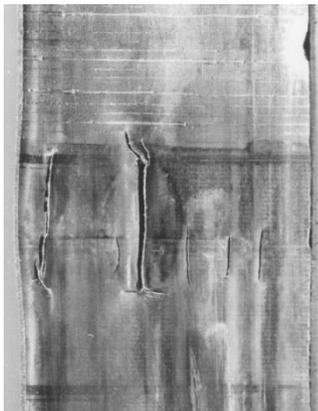
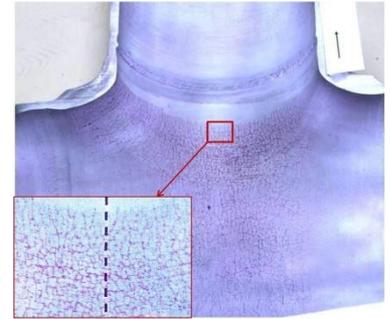
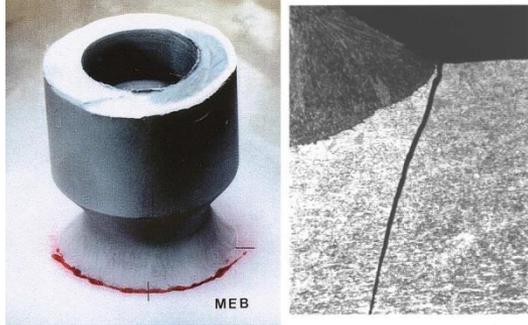
Excellence au quotidien

- Excellence = sûreté, compétitivité, transparence
- La préoccupation « durée de vie » est intégrée dans toutes les activités (la bataille de la durée de vie se gagne au quotidien)
- Démarche d'amélioration permanente basées sur le retour d'expérience français et étranger :
 - Analyses de tous les événements significatifs
 - Aspects techniques ET non-techniques
 - Leçons tirées = améliorations immédiates ou regroupées dans le cadre des réexamens décennaux
- Actions spécifiques pour minimiser / maîtriser le vieillissement en optimisant les modes d'exploitation, la surveillance, les programmes de maintenance
- Collecte des données utiles pour démontrer que l'exploitation peut être poursuivie

Le vieillissement des matériels

- Malgré tout, les matériels "vieillissent"
 - Sous de multiples formes : usure, fatigue, corrosion en tous genres, etc.
 - On sait plus ou moins modéliser et prévoir ces phénomènes
- La sûreté n'est généralement pas impactée, même s'il y a défaillance : marges à la conception + redondances = les REP sont "pardonnants"
- Que fait l'exploitant ?
 - Il surveille
 - Il entretient (pour ralentir ou compenser les endommagements)
 - Il répare (si c'est possible et pertinent)
 - Il remplace (ni trop tôt, ni trop tard)
 - Il peut aussi modifier les conditions d'exploitation pour ralentir les endommagements (exploiter "en douceur")
- Tout est gérable sans nuire à la sûreté... à condition de ne pas attendre la dernière minute !
 - Il est prudent d'**ANTICIPER** (prendre de la **marge** par rapport aux limites)

Exemples d'endommagement



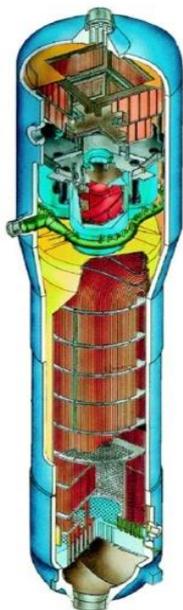
Gestion de la durée de vie des matériels

- Presque tous les matériels sont remplaçables... pour autant qu'on s'y prenne bien
- **Petits matériels**
 - remplacements programmés au moment le plus judicieux
 - Systématiques
 - Décidés par suivi d'indicateurs
 - si on se trompe un peu, l'erreur est rattrapable
 - enjeu : optimisation des stocks de pièces de rechange
- **Gros matériels : prudence !**
 - Les délais d'approvisionnement et de préparation sont TRES longs
 - On ne saurait pas en remplacer beaucoup en même temps
 - Une seule solution : ANTICIPER pour se donner de la marge
 - **Chaque gros composant fait l'objet d'une stratégie anticipatrice au niveau Parc**

Gestion de la durée de vie des gros composants

- GV, pompes primaires, turbines, alternateurs, condenseurs, transformateurs, systèmes de CC, etc.
- Identifier les mécanismes de dégradations avérés ou potentiels, prévoir l'évolution, évaluer les probabilités de défaillance et les conséquences
- Analyse technico-économique des différentes stratégies possibles
 - Rien / entretien "normal" / rénovation / remplacement : quoi ? Quand ? Comment ?
 - Actions d'anticipation éventuelles : surveillance renforcée, développement d'outillages, entraînement des équipes, approvisionnement anticipé, ...
- Choix et mise en œuvre de la "meilleure" stratégie
 - Celle qui fait gagner le plus si les choses se passent comme prévu
 - Celle qui fait perdre le moins si les choses ne se passent pas comme prévu
- Généralement, si on est sûr que le remplacement est inéluctable à terme, la meilleure option n'est pas de faire durer le plus longtemps possible une famille de composants, c'est d'optimiser la programmation de son remplacement du point de vue industrielle

L'exemple des GV



- Un GV a entre 3000 et 5000 tubes
- Quand un tube est trop endommagé, on le bouche
- On peut boucher jusqu'à 20% des tubes, ensuite il faut le remplacer
- EDF anticipe par rapport à cette limite pour être sûr de ne pas avoir à remplacer beaucoup de GV en même temps et sans préavis (pouvoir faire face à une erreur de prévisions...)
- Modèle probabiliste sophistiqué pour corrélérer l'évolution des multiples modes de dégradation, la probabilité de rupture des tube et l'espérance de vie du GV



Centrale DdV Jan 17



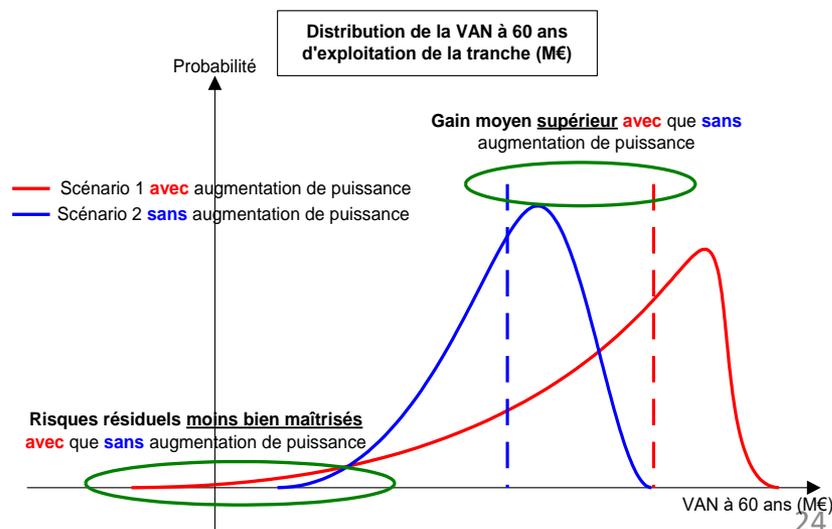
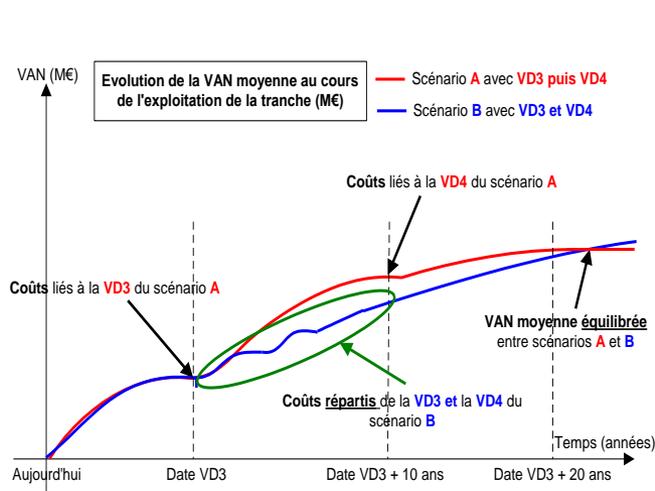


Autres exemples



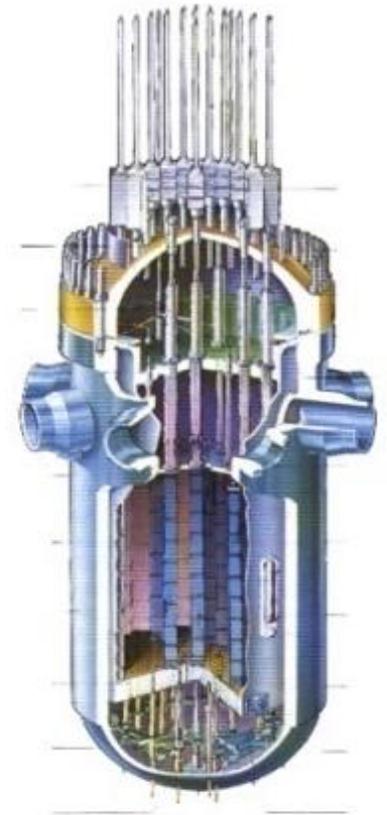
Optimiser globalement LES stratégies (gestion du patrimoine)

- Les stratégies pour chaque composant interagissent, l'ordre des opérations n'est pas indifférent → vision globale nécessaire
- Méthodes, modèles et outils pour l'évaluation technico-économique en univers incertain d'une tranche complète
- Scénarios probabilisés combinant les menaces et les options relatives aux composants, plus les effets croisés
- Quelles rénovations, quels investissements et à quels moments ?



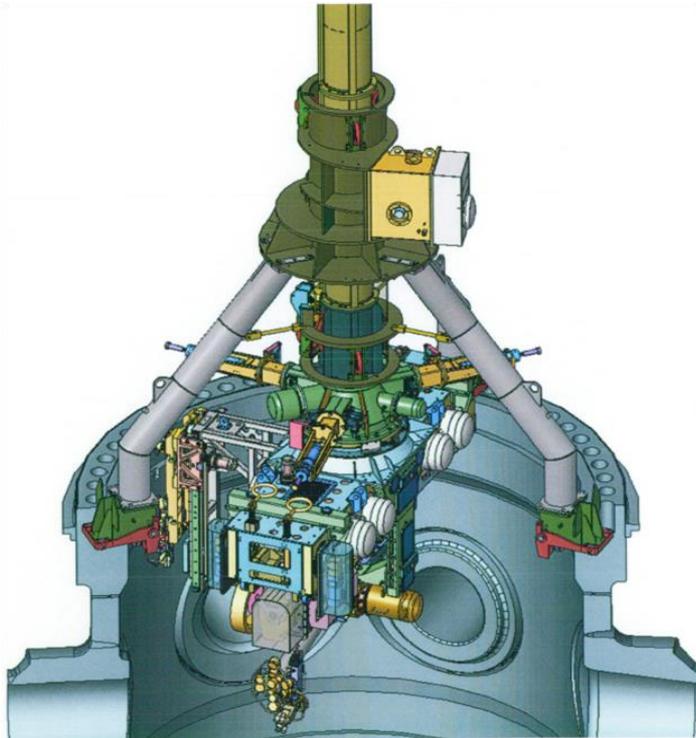
Matériel non-remplaçable : la cuve

- La cuve de la chaudière contient le combustible
- Il n'y a pas de parade en cas de rupture complète
- *La rupture de cuve doit rester hautement improbable*
- Rupture d'une cuve =
 - Des défauts métallurgiques dans la paroi
 - Des efforts importants appliqués à ces défauts
 - Un matériau ayant une mauvaise ténacité (= résistance à la rupture)
- La science nous permet de prévoir quelle combinaison de ces trois paramètres peut conduire à une rupture
- La démonstration de sûreté d'une cuve consiste donc à montrer que, connaissant les trois paramètres déterminants, la probabilité de rupture est suffisamment faible

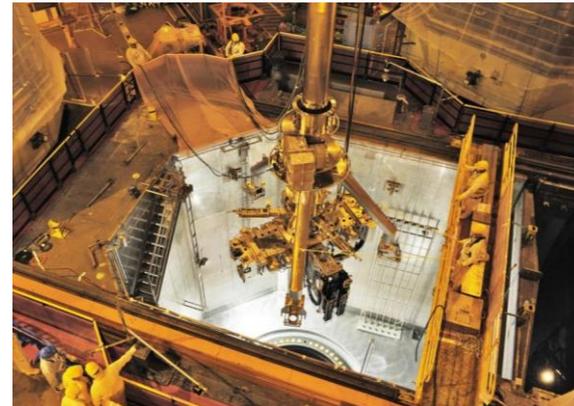


• Les défauts métallurgiques

- Quelques mm au maximum (dans une paroi de 200 mm)
- Viennent de la fabrication, donc connus par les contrôles en usine
- N'ont pas de raison d'évoluer : vérification tous les 10 ans
- Méthodes et outils d'examens très performants (ultra-sons focalisés)

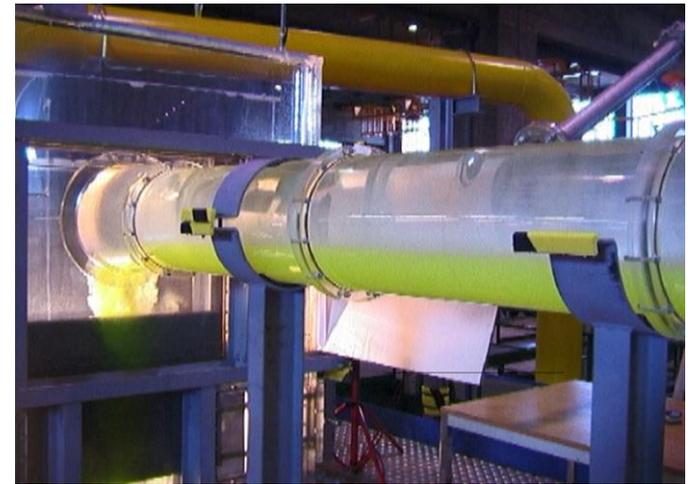
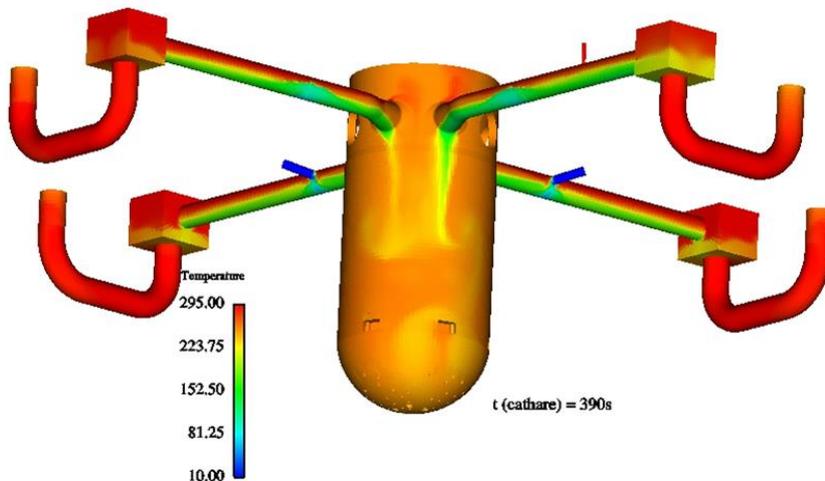


Centrale DdV Jan 17



- Les efforts auxquels la paroi peut être soumise

- connus par des calculs et des essais
- simulation des situations accidentelles conduisant aux efforts les plus grands
- Ils sont indépendants de l'âge



- **Les caractéristiques mécaniques de l'acier**

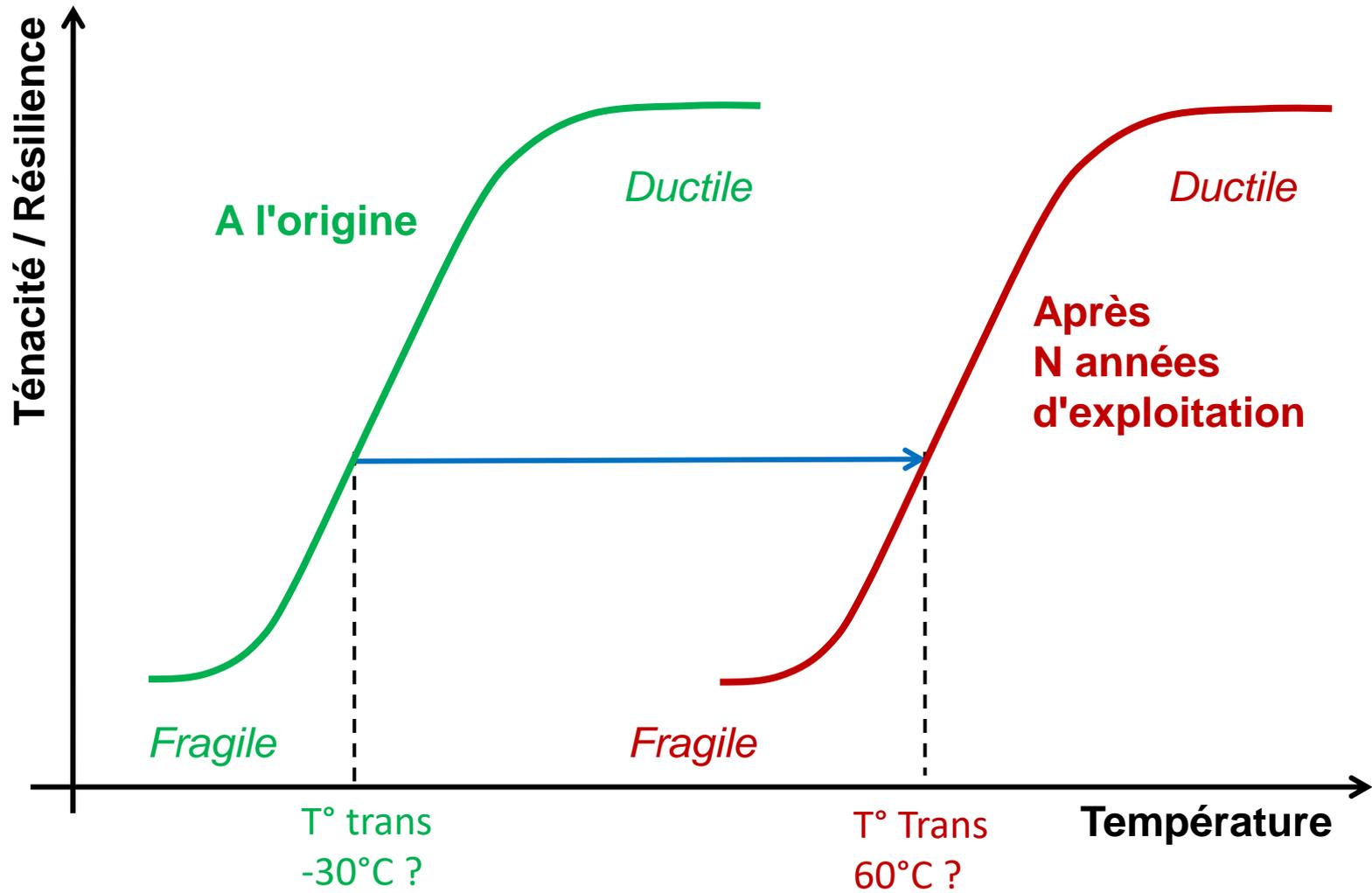
- Ténacité, température de transition, etc
- Mesurées à l'origine
- Valeurs très bonnes

→ Avec ces données initiales, on démontre facilement que la probabilité de rupture des cuves est négligeable...

MAIS...

...au fur et à mesure des années, les caractéristiques mécaniques de l'acier "se dégradent" sous l'effet des neutrons émis par le cœur

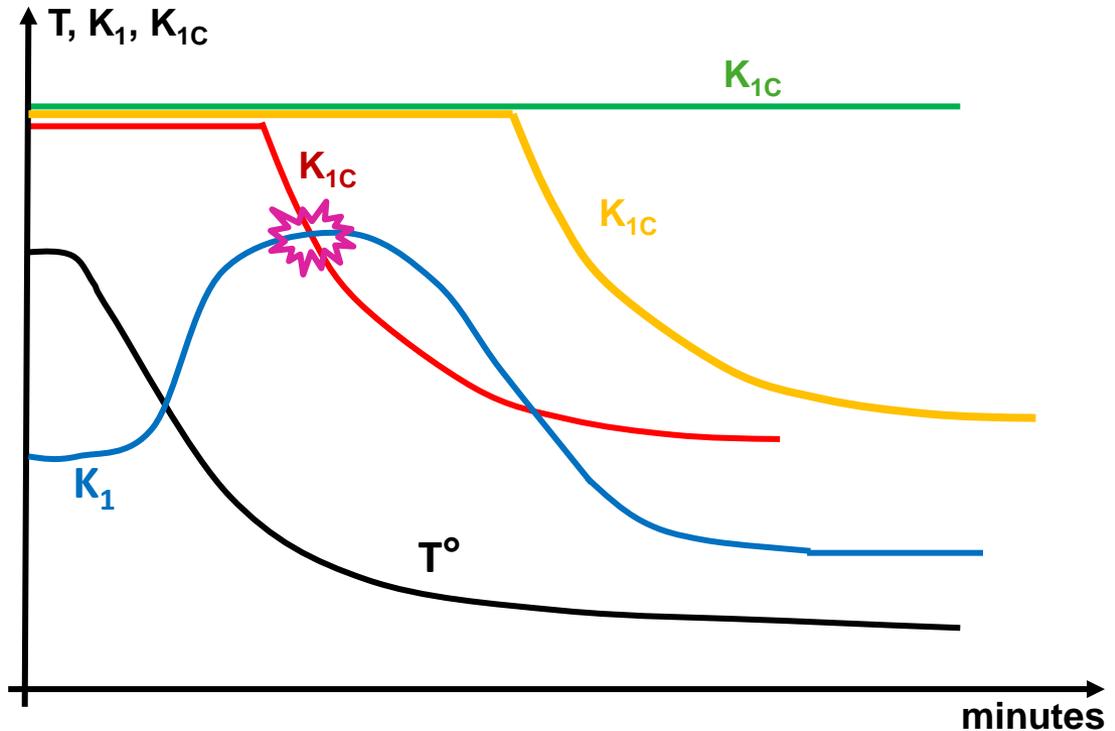
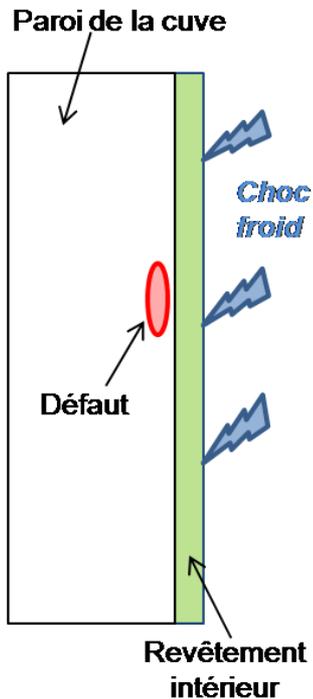
- phénomène de "fragilisation" plus ou moins important selon les cuves
- augmentation de la T° de Transition



Prise en compte de la "fragilisation"

- On fait donc des prévisions sur ce que sera cette évolution
 - Essais très nombreux
 - Connaissances du lien entre
 - fluence (quantité de neutrons reçus),
 - évolution des propriétés de l'acier (décalage de la T° de transition)
 - et composition chimique de l'acier
- On fait la démonstration de sûreté de chaque cuve en prenant comme caractéristiques de l'acier, les valeurs prévues au bout de N années
- Pour les cuves françaises, démonstration OK pour 40 ans
- Etude en cours pour 60 ans mais il est sûr que la conclusion sera favorable

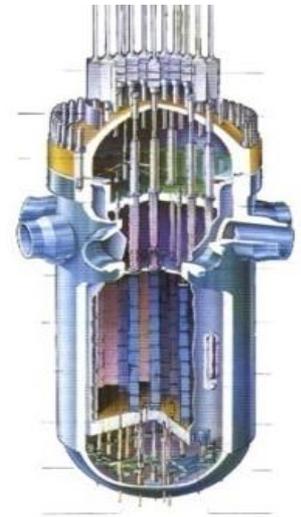
Evolution de la situation au bord d'un défaut, au cours d'un transitoire accidentel avec injection de sécurité



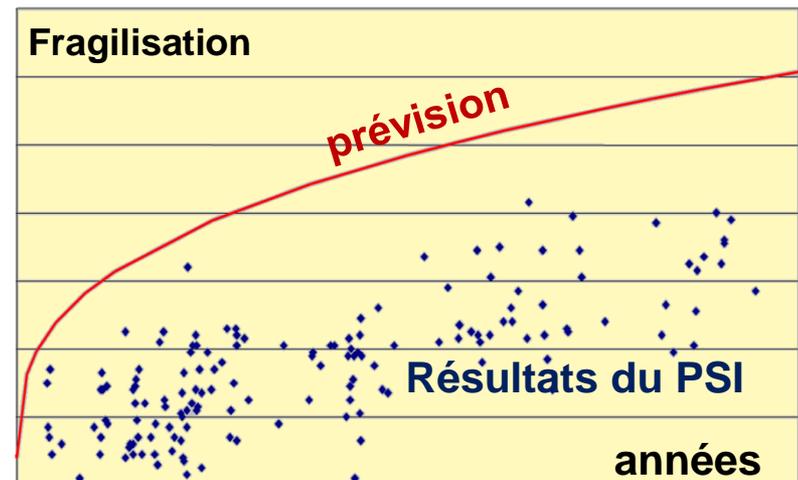
- Température
- Facteur d'intensité de contrainte K_1
- Ténacité K_{1C} en début d'exploitation
- Ténacité K_{1C} après N années d'exploitation
- Ténacité K_{1C} après X années d'exploitation

Oui mais...

- Que valent ces prévisions sur les propriétés de l'acier ?
- L'exploitant les vérifie avec le PSI (Programme de Surveillance de l'Irradiation)
 - Des échantillons d'acier de chaque cuve ont été prélevés au moment de la fabrication
 - Ces échantillons sont placés DANS la cuve, à des endroits où ils reçoivent plus de neutrons que la paroi → ils se fragilisent plus vite qu'elle
 - On en retire périodiquement et on mesure les propriétés de l'acier
 - On a ainsi une estimation de ce que sera la ténacité de l'acier de la paroi dans X années
 - C'est ainsi qu'on vérifie les prévisions

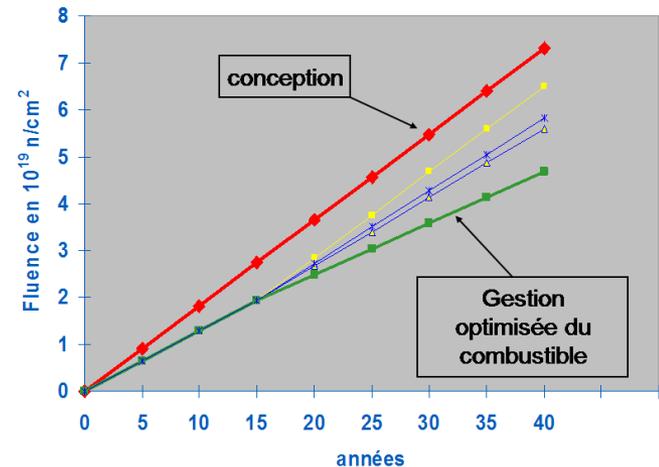


Centrale DdV Jan 17



Durée de vie des cuves

- Avec tous ces éléments, on peut affirmer que les cuves françaises sont sûres (probabilité de rupture quasi-nulle) pour au moins 40 ans et très certainement 60
- Mieux : depuis les années 90, EDF dispose le combustible dans la cuve d'une façon qui minimise le flux de neutrons... et donc qui minimise l'évolution de la ténacité de l'acier

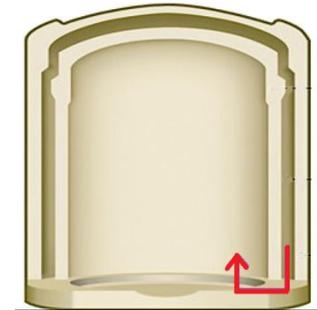
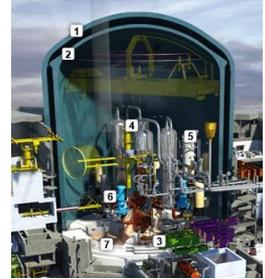


→ **Les cuves ne devraient pas limiter la durée de vie des centrales françaises**

- Même conclusion en Belgique, en Allemagne, au Japon
- Conclusions différentes pour certaines centrales exploitées aux USA ou dans l'ex-bloc soviétique

Matériel non remplaçable : l'enceinte de confinement

- L'enceinte de confinement (ou BR) a deux fonctions :
 - Résister à la pression interne et rester étanche en cas d'accident à l'intérieur
 - Résister aux "agressions" externes
- Deux modèles :
 - Enceinte 900 : une paroi en béton précontraint et une peau métallique interne
 - Enceinte 1300 et 1450 : double paroi en béton avec reprise des fuites entre les deux
- Pas de problème sur les 900
 - Évolution, tassement, dégradations mineures, tout est conforme à ce qui était attendu
- Sur certaines enceintes à double paroi :
 - Fuite de l'enceinte interne dépasse les prévisions
 - Aucune conséquence externe mais...
 - écart → traitement
 - Revêtement en composite



→ Pas d'inquiétude pour les BR sur 40 ou 60 ans

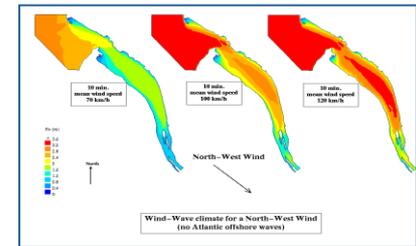
Les visites et réexamens de sûreté décennaux

- Tirer les leçons de l'expérience (la notre et celle des autres)
- Faire le bilan des connaissances nouvelles
- Sur cette base, définir de nouvelles exigences de sûreté (par palier)
- Modifier les installations (et leurs modes d'exploitation) pour **qu'elles respectent ces nouvelles exigences (si nécessaire)**
- Réaliser les gros travaux de maintenance (rénovation, remplacement)
- Réaliser des inspections, des investigations, des essais très approfondis

→ La sûreté des centrales nucléaires françaises s'améliore avec l'âge, malgré le vieillissement des matériels

Exemples d'évolution décennale des exigences de sûreté

- **Suite tempête 99 et inondation Blayais**
 - Révision de la crue centennale = nouvelles exigences
 - Mise en place de dispositifs anti-inondations supplémentaires
- **Suite Fukushima : le prochain réexamen de sûreté inclura les leçons tirées**
 - Résistance aux agressions externes (piscines combustible)
 - Redondance accrue pour l'alimentation en eau du cœur
 - Moyens supplémentaires pour produire l'électricité dont la centrale a besoin :
 - moyens permanents mieux protégés,
 - moyens de secours à amener



Le grand carénage

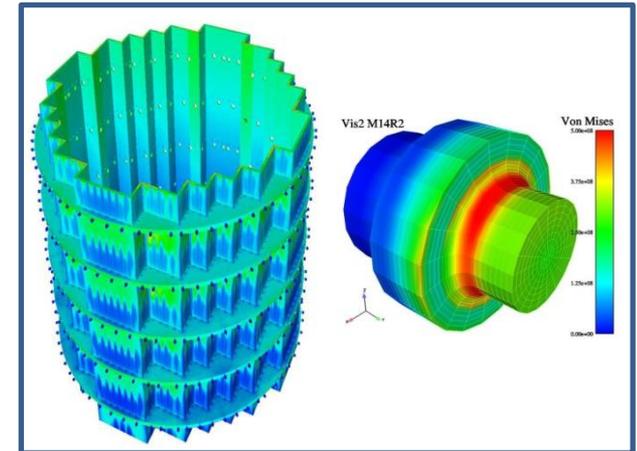
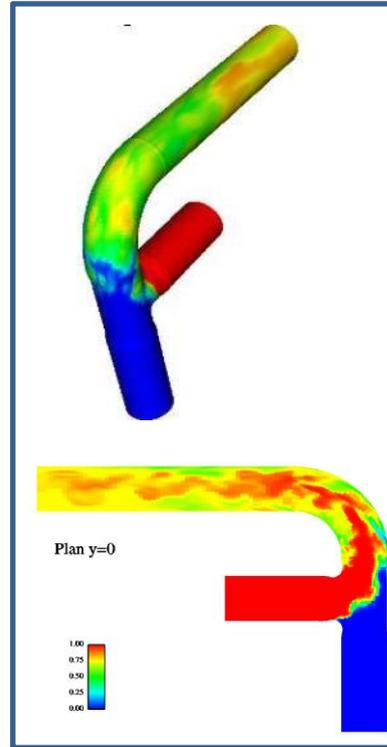
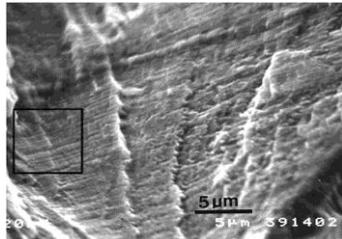
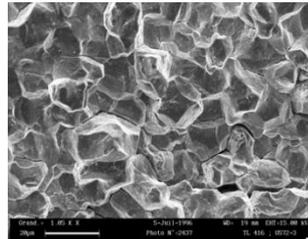
- Des grands travaux de cette nature ont été réalisés sur les tranches françaises lorsqu'elles ont atteint 10 ans (VD1), 20 ans (VD2), 30 ans (VD3)
- Les premières tranches approchent 40 ans : on prépare les VD4 du Parc français
- On y fera tous les travaux "habituels" d'une VD
 - réexamen de sureté,
 - mise à niveau par rapport aux nouvelles exigences
 - visites et contrôles approfondis
 - gros travaux de rénovation et de remplacement de matériels
- Le volume de travaux sera plus important que pour les VD précédentes
 - Environ 50 milliards d'€uros sur la période (2015 – 2025)
 - Un fort enjeu pour l'industrie en général
 - Optimiser la mise en œuvre industrielle par un pilotage intégré de l'ensemble

= programme "Grand Carénage"
- Ceci doit permettre d'exploiter les tranches jusqu'à 50 puis 60 ans en toute sûreté

Le programme "durée de vie"

- Un programme permanent comprenant des études, des essais, de la recherche pour améliorer les connaissances dans le domaine
- Objectif : s'assurer qu'on fait bien tout ce qu'il faut pour exploiter les tranches longtemps en toute sûreté
 - Confirmer ce que l'on sait déjà
 - Compléter les connaissances là où elles sont insuffisantes
- Toutes les sciences, toutes les disciplines
- Coopération avec les organismes de recherche français et avec les organismes étrangers
- Coopération entre tous les exploitants
- En France, environ 1000 experts et 100 M€ / an pour la R&D touchant à la durée de vie des centrales nucléaires
- **Investiguer pour comprendre pour prévoir pour durer !**

R&D et Durée de vie



Pérennité du soutien externe



- **Menaces**

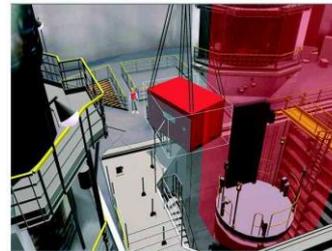
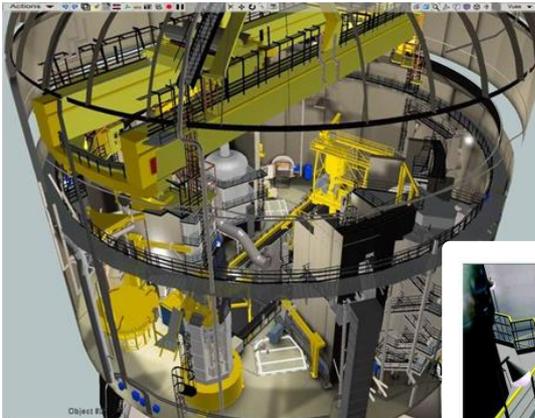
- Arrêt des fabrications de pièces de rechange
- Arrêt des activités de service
- Disparition / rachat / restructuration des entreprises

- **Politique EDF :**

- Mise en concurrence raisonnable : aiguillonner sans mettre en péril
- Avoir un panel minimal pour chaque produit, chaque service (éviter les situations de monopole)
- Partenariat avec les fournisseurs pour leur donner une visibilité pluriannuelle leur permettant d'investir et de se renforcer
- Viser des produits standards, autant que faire se peut
- EDF a mis en place un Observatoire de la pérennité des entreprises
 - Identifier celles qui sont sensibles et fragiles
 - contrats de pérennité pour les aider à maintenir leur moyens et leurs compétences
 - Ré-internaliser si nécessaire (maintien du savoir-faire) mais...

Perte des compétences

- Anticipation des départs en retraite
- Formation interne, compagnonnage, ...
- Coopération avec les organismes de formation pour qu'ils maintiennent des cursus appropriés
- Usage des nouvelles technologies pour la formation et l'entraînement



Les autres menaces



- **Evolution de l'environnement de la centrale**

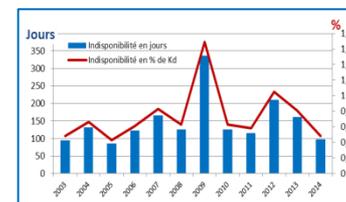
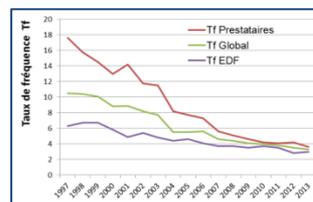
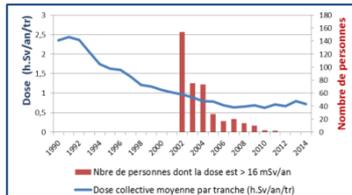
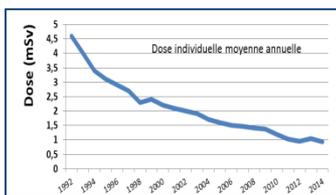
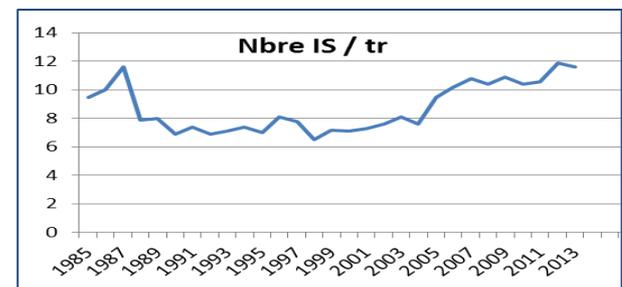
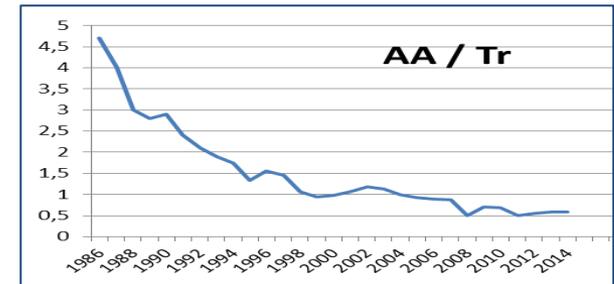
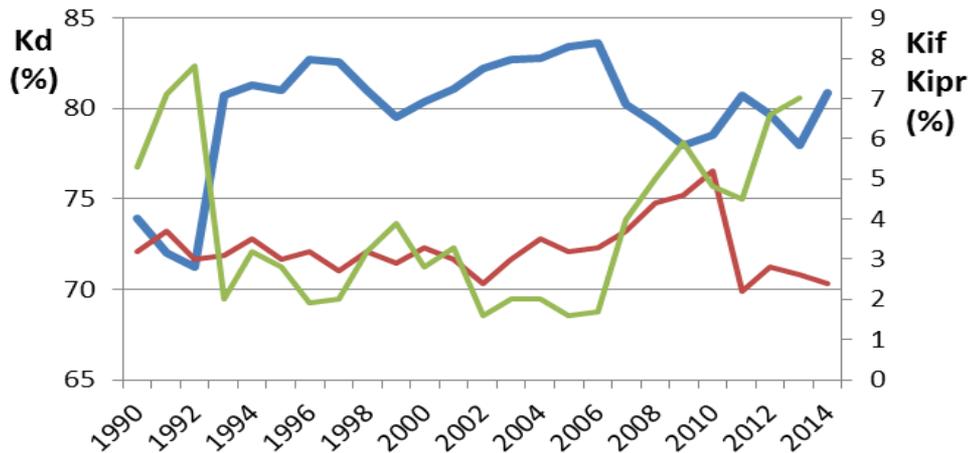
- Plus d'eau dans les rivières...
- ... ou de l'eau trop chaude
- Parade : lutter contre le réchauffement climatique en réduisant les émissions de gaz à effet de serre...
- ... et donc poursuivre l'exploitation des centrales nucléaires !

- **Evolution de l'opinion et perte de la confiance des citoyens**

- *L'opinion des citoyens ? Des médias ? Des politiques ?*
→ *Qui influence qui ???*
- La parade :
 - l'excellence dans l'exploitation
 - la transparence (mais que c'est difficile !)

Des indicateurs globaux d'un vieillissement général ?

- Taux de défaillances des matériels, coûts d'exploitation et de maintenance relativement stables
- Fréquence des **incidents** stable (événements déclarés de plus en plus "anodins")
- Nombre d'arrêts automatiques, doses reçues par le personnel : en diminution
- Des fluctuations de ces indicateurs, des pointes et des creux liés à des événements spécifiques, mais pas de tendance lourde qui serait le signe d'un vieillissement généralisé (au contraire !)



Conclusions

- Pour les experts du domaine (ceux qui ont à la fois la connaissance et l'expérience), il n'y a pas d'obstacle technique qui empêcherait de poursuivre l'exploitation des tranches nucléaires françaises **en toute sûreté** au-delà de 40 ans
- L'exploitant EDF fait tout ce qu'il faut pour cela
- L'électricité est ainsi produite de façon fiable et à un prix raisonnable qui bénéficie à TOUTE l'économie du pays
- Cela dit, il appartient aux citoyens et à leurs représentants de choisir des orientations politiques en matière d'énergie et de fourniture d'électricité
- Les industriels suivront ces orientations... avec d'autant plus de facilité qu'elles seront cohérentes...



Merci de votre attention !

