



fermeture de la centrale nucléaire de Fessenheim & transition énergétique en France

Thierry de Laroche Lambert

Professeur associé à l'Institut Femto-ST
CNRS-UMR6174, Département Énergie
Chaire Supérieure de Physique-Chimie
Docteur en Énergétique

courriel : thierry.de-laroche Lambert@femto-st.fr



-
1. introduction
 2. risques et sûreté nucléaire à Fessenheim
 3. fermer Fessenheim: un enjeu local, national et international
 4. après la fermeture de Fessenheim: propositions

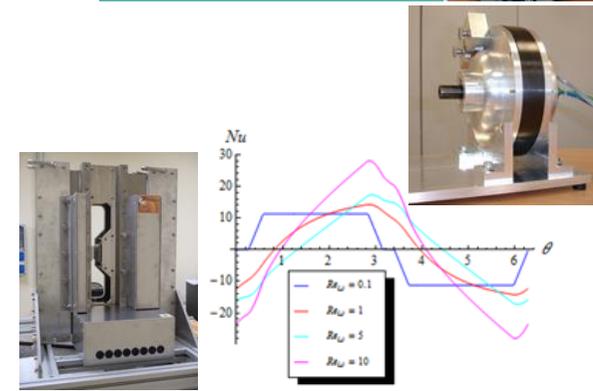
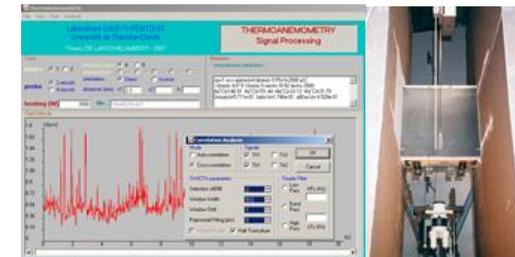
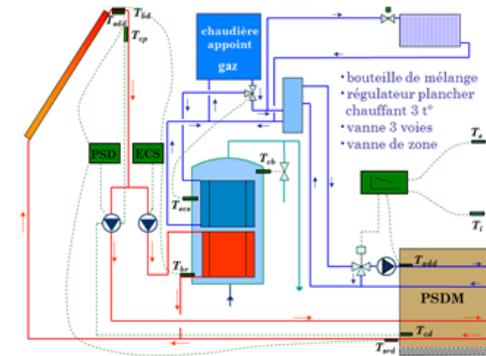
1. introduction

1.1. présentation

- ❑ Agregate Professor Physics & Chemistry
- ❑ PhD Energetics (High-Alsace University)
- ❑ High-Chair Professor in Physics & Chemistry
- ❑ Associate Professor, Researcher at the Risks and Environment Management Laboratory (*Laboratoire Gestion des Risques et Environnement*) - High Alsace University - France (1997-2007)
- ❑ Associate Professor, researcher in the FEMTO-ST Institute, Energy Department, Belfort (2007-2018)
- ❑ Magnetocaloric Devices Research Group manager at the Energy Department / FEMTO-ST Institute (2015-2018)

Main topics

- ❑ Cofounder of the “**Projet Alter Alsace**” (today: “**Alter Alsace Energies**”) (1980)
- ❑ Geothermal heating project for Lutterbach city (1980-1986)
- ❑ Research on **regional 100% renewable energy scenarios** (book “*Les énergies de l’Alsace – Projet Alter*” – 1983)
- ❑ Design, optimization, realization, measurement, physical modelling of the so-called “*Mixed Direct Solar Heating Floor*” (*Plancher Solaire Direct Mixte*) – 1990-2005
- ❑ **Transition to turbulence in natural convective boundary-layers along strongly heated vertical walls**
- ❑ Development of the **SWICTA measurement method** (*Sliding Window Cross-correlation Thermo-Anemometry*)
- ❑ Lectures in « **Experimental and Theoretical Fluid Mechanics** » at ENSISA Engineers School
- ❑ Researches on the **magnetocaloric effect and development of Active Magnetic Regenerator Refrigeration systems**
- ❑ **Modelling of the critical phenomena, critical exponents, state equation during ferromagnetic transition in gadolinium**
- ❑ Lectures in « **Solar Energy in Bioclimatic Buildings** », University of Franche-Comté, CNAM Alsace
- ❑ **Mathematical assessment of heat and momentum transfer in alternating incompressible flows**
- ❑ **Energy policy analysis and transition towards a 100% renewable system assessment**

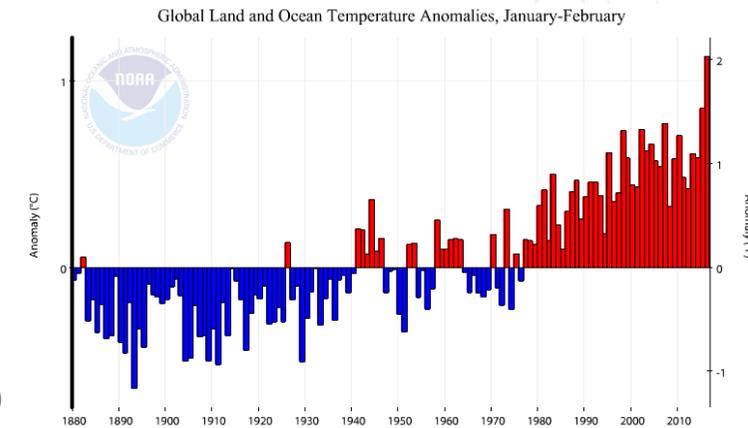


1. introduction



1.2. un contexte international bouleversé

- **changement climatique accéléré**
- tensions sur les ressources fossiles
- explosion de la production de gaz de schistes aux USA (et des émissions de CH₄)
- **écroulement mondial des prix du pétrole** (140 \$/b 2008 → 40 \$/b 2016) et du charbon
- **catastrophes nucléaires** (TMI 1979, Tchernobyl 1986, Fukushima 2011, ...?)
 - ▶ **sorties du nucléaire programmées** (Allemagne, Belgique, Corée du Sud, Italie, Suisse, etc.)
- **coûts, incertitudes nucléaires** (vieillesse, déchets, démantèlement, risques terroristes, risques d'accidents majeurs, dissémination des technologies nucléaires)
- **prolifération nucléaire militaire** (Pakistan, Iran, Inde, Israël, Corée du Nord, ...?)
- **dépendance énergétique européenne élevée** (pétrole, gaz, uranium)
- **marché du carbone**: échec du Protocole de Kyoto EU-ETS (28 €/tCO₂ 2008 → 3 €/tCO₂ 2013, 2 Gt quotas non échangés, escroqueries mafieuses TVA quotas)
- **insuffisance des objectifs européens 2030** (-27% de consommation d'énergie; -40% d'émissions de GES; 27% ENR par rapport à 1990) **et 2050**
- **développement rapide des ENR dans le monde**



1. introduction



1.3. les grandes transitions énergétiques européennes

● Allemagne: *Energiekonzept, Energiewende* (2010)



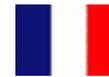
- ▶ -80% à -95% de gaz à effet de serre en 2050 / 1990
- ▶ -50% de consommation primaire en 2050 / 2008
- ▶ -25% de consommation électrique en 2050 / 2008
- ▶ 60% d'énergie finale consommée = **énergies renouvelables en 2050**
- ▶ 80% de la consommation électrique = **énergies renouvelables en 2050**
- ▶ **sortie du nucléaire en 2022**

● Danemark: *Energiaftalen* (2012)



- ▶ mars 1985: débats démocratiques, vote Parlement danois → **renoncement définitif à l'énergie nucléaire**
- ▶ 35% de la consommation d'énergie finale = **énergies renouvelables en 2020**
- ▶ 50% de la consommation électrique = **énergie éolienne en 2020**
- ▶ 100% de la consommation d'électricité et de chaleur = **énergies renouvelables en 2035**
- ▶ 100% de l'approvisionnement énergétique danois = **énergies renouvelables en 2050**

● France: *loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte* (2015)



- ▶ -40 % de gaz à effet de serre en 2030, -75% en 2050 / 1990
- ▶ -20% d'énergie finale consommé en 2030; -50% d'énergie finale en 2050 / 2012
- ▶ 32 % d'énergie finale consommée = énergies renouvelables en 2030
- ▶ **production maximale d'électricité d'origine nucléaire 63,2 GW, part du nucléaire dans l'électricité 50 % en 2025 (?)**
- ▶ PPE 2019-2023 et 2023-2028, puis tous les 5 ans ⇒ approvisionnement, efficacité, sobriété, ENR, réseaux, stockage, pilotage, formation (**mais nucléaire exclu!**)

● Suisse: *nouvelle loi sur l'énergie* (2018)



- ▶ consommation EP/hab: -16% (2020), -43% (2035) / 2000
- ▶ consommation électrique/hab: -3% (2020), -13% (2035) / 2000
- ▶ ENR 2035: hydroélectricité 37,4 TWh, autres: 11,4 TWh
- ▶ **sortie du nucléaire d'ici 2050 (pas de nouvelles centrales, arrêt progressif des réacteurs sur critères de sécurité exclusivement)**

2. risques et sûreté nucléaires à Fessenheim

2.1. fermeture de Fessenheim: la difficile fin d'un dogme

2.1.1. prolongement à 40 ans

- **VD3 Fessenheim 1** (17-10-2009 → 24-03-2010)
 - autorisation de fonctionnement *pour 10 ans* sous réserves (avis ASN 2011-DC-0231):
 - **renforcement du radier avant le 30-06-2013** (*voir plus loin*)
 - **installation de dispositifs d'évacuation de puissance si perte de source froide avant le 31-12-2012**
 - modifications pour prévention du risque de vidange de la piscine du bâtiment combustible
 - mesures de protection « *appropriées* » en cas de séisme majoré de sécurité
- **VD3 Fessenheim 2 + ECS** (06-04-2011 → 06-03-2012)
 - autorisation de fonctionnement *au-delà de 30 ans* sous réserves (avis ASN 2013-DC-0342):
 - idem FES1
 - **remplacement des GV avant le 31-12-2012**
 - fissures évolutives et nouvelles sur les viroles B et C1 de cuve
 - **nécessité d'un contrôle rigoureux et fréquent de la tenue sous fluence des aciers de cuve** (*voir plus loin*)
 - **relèvement de 10°C la RT_{NDT} des viroles de cuve et de 3°C celle des soudures** (avis IRSN)
 - **fortes incertitudes sur l'évolution des aciers sous fluence au-delà de 40 ans (32 ans JEPP)**
 - **obligation de maintenir l'eau du CIS (circuit injection sécurité) à au moins 20°C**
 - **arrêt automatique en cas de séisme envisagé (non réalisé)**

Conclusions :

- **les centrales nucléaires ont fonctionné en mode de sécurité dégradé depuis 1977**
- **l'accident majeur n'était pas envisagé dès la conception des centrales**

2. risques et sûreté nucléaires à Fessenheim

2.1. fermeture de Fessenheim: la difficile fin d'un dogme (2)

2.1.2. loi TEPCV et fermeture de Fessenheim

- accord électoral François Hollande-EELV
- **LTEPCV (17-08-2015): plafonnement de la puissance nucléaire, gouverné par EDF**
 - « Art. L. 311-5-5.-L'autorisation mentionnée à l'article L. 311-1 (*ouverture d'une nouvelle installation de production d'électricité*) ne peut être délivrée lorsqu'elle aurait pour effet de porter la **capacité totale autorisée de production d'électricité d'origine nucléaire** au-delà de **63,2 GW** »
 - « Art. L. 593-26.-Lorsque **l'exploitant** prévoit d'arrêter définitivement le fonctionnement de son installation ou d'une partie de son installation, il le déclare au ministre chargé de la sûreté nucléaire et à l'Autorité de sûreté nucléaire. Il indique dans sa déclaration la date à laquelle cet arrêt doit intervenir (...). « La déclaration mentionnée au premier alinéa du présent article est souscrite **au moins deux ans avant la date d'arrêt prévue** ».
- **décret n° 2017-508 (08-04-2017): conditionnement de l'arrêt de la centrale nucléaire de Fessenheim**
 - « le décret abroge, **sur demande de l'exploitant** présentée en application de l'article L. 311-5-5 du code de l'énergie, l'autorisation d'exploiter la centrale nucléaire de Fessenheim dont EDF est titulaire, **à compter de la date de mise en service de l'EPR de Flamanville 3** dès lors que cette abrogation est nécessaire au respect du plafonnement de la capacité nucléaire et que la mise en exploitation de l'EPR de Flamanville 3 intervient avant le 11 avril 2020 »

Conclusions :

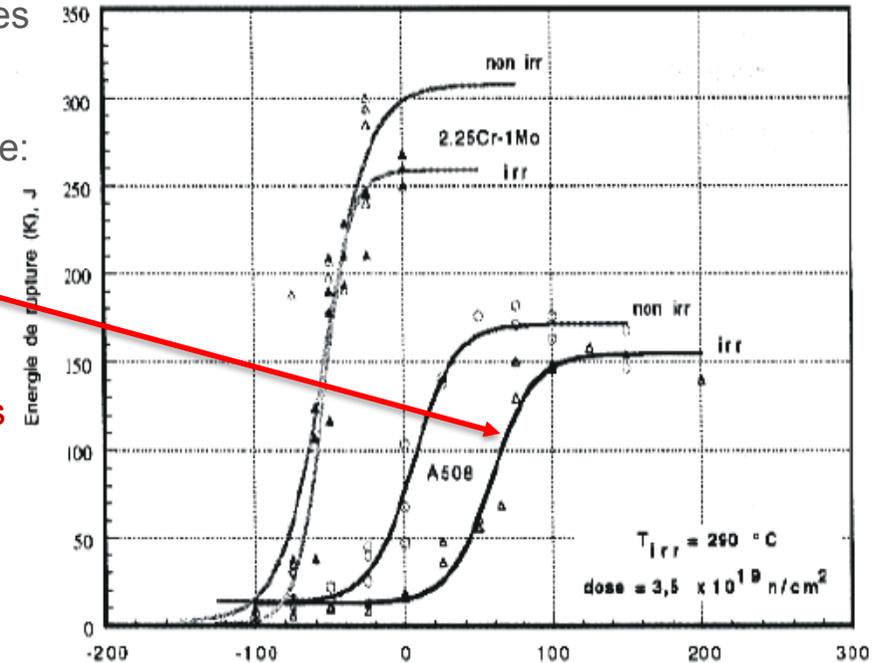
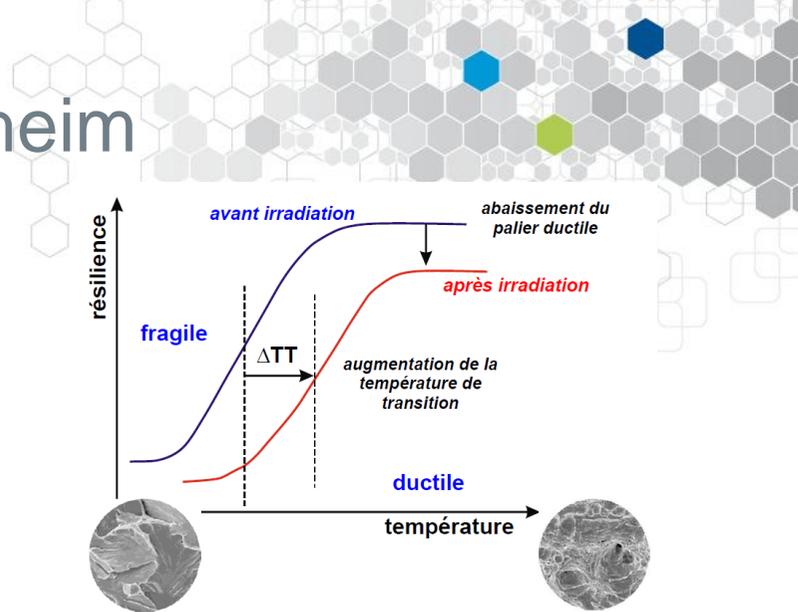
- **l'Etat actionnaire à 85% d'EDF se retranche derrière EDF et laisse l'ASN décider**
- **l'Etat prend le risque de prolonger l'exploitation de FES1 et FES2 en mode de sécurité dégradée**
- **il entretient le dogme d'EDF du maintien de la puissance nucléaire maximale, considérée comme minimum**

2. risques et sûreté nucléaires à Fessenheim

2.2. les risques de la prolongation d'exploitation

2.2.1. vieillissement, fatigue des matériaux sous contrainte

- **vieillissement des aciers de cuve, viroles et couvercle sous irradiation :**
 - déplacements atomiques↑
 - modifications structurales: dislocations, ségrégations intergranulaires
 - durcissement, perte de ductilité, fragilisation aux chocs
 - *fluence maximale spécifiée* $7,3 \cdot 10^{19}$ neutrons/cm²
 - fragilisation des aciers fissurés (16MND5) par irradiation neutronique:
 - *fortes teneurs en P, Mn, Cu*
 - *ségrégations veines sombres plus fragiles*
 - *élévation du seuil de transition ductile/fragile avec la fluence:*
 RT_{NDT} en fin de vie = RT_{NDT} en début de vie + $\Delta(RT_{NDT})$
 - ▶ $\Delta RT_{NDT} > 80^\circ\text{C}$, voire 120°C (Fessenheim, Bugey, etc.)
 - *risque de rupture d'acier en cas de refroidissement brusque sous pression (arrêt d'urgence)*
 - fluences élevées à Fessenheim: jusqu'où?
 - ⇒ *fragilisation en cas de séisme majeur*
 - ⇒ *fatigue thermique accrue*
 - ⇒ *risque de rupture de cuve accru*



2. risques et sûreté nucléaires à Fessenheim

2.2. les risques de la prolongation d'exploitation

2.2.1. vieillissement, fatigue des matériaux sous contrainte (2)

- **données scientifiques:**

→ *Perform 60 : prediction of the effects of radiation for reactor pressure vessel and in-core materials using multi-scale modelling – 60 years foreseen plant lifetime*, A. Al Mazouzi et al., Nuclear Engineering and Design 241 (2011) 3403-3415

« (...) the influence of these variations on the material properties cannot be determined straightforwardly from the surveillance program. Moreover, notwithstanding their conservatism, *the empirical dose–damage relationships cannot be extrapolated to predict the behaviour of the material if the design lifetime of the reactors (normally 40 years) is to be extended*. For this purpose, experimentally validated physically-based models are needed to optimise the lifetime of this critical component.

(...) *some components inside a pressurised water reactor (PWR) may be exposed to doses reaching around 80 dpa after 40 years of operation* (that is more than a thousand times higher than the dpa dose for the RPV). Due to neutron irradiation, nanostructure changes and so consequently do the mechanical properties of internal materials. These changes include the formation of loops, non-equilibrium segregation precipitation and possibly void swelling, features associated with hardening, and a **strong decrease in ductility and toughness**, irradiation creep, etc.

(...) While predictive models of irradiation-induced hardening are available, reliable predictions of void swelling and IASCC sensitivity are currently unavailable.

(...) *the brittle intergranular fracture criterion appears to be still an open issue*.

(...) further improvements of the existing models, especially on what concerns the use of crystal plasticity to study the fracture probability distribution of representative volumes, are still needed. »

2. risques et sûreté nucléaires à Fessenheim

2.2. les risques de la prolongation d'exploitation

2.2.1. vieillissement, fatigue des matériaux sous contrainte (3)

- que dit l'IRSN?

→ *Le point de vue de l'IRSN sur la sûreté et la radioprotection du parc électronucléaire français en 2010:*

L'IRSN considère que les formules retenues et la méthode d'ajustement (*pour la prédiction de la fragilisation sous irradiation*) adoptée par EDF sont recevables, mais constate, à l'examen des seuls résultats du PSI, *qu'elles peuvent conduire à une légère sous-estimation des fluences élevées*. (...) L'IRSN a d'ailleurs constaté que, sur le nombre de valeurs de fragilisations mesurées dans le cadre du PSI dans le matériau des viroles des cuves, *la nouvelle formule proposée conduit à un nombre de cas hors prévision supérieur à celui attendu*.

(...) Dès lors, compte tenu de la sous-estimation de la fragilisation aux fluences élevées et de la dispersion sous-évaluée des mesures de fragilisation, *l'IRSN a recommandé qu'EDF augmente le niveau de fragilisation estimé à 40 ans à l'aide de ses nouvelles formules en relevant de 10°C la RTNDT des viroles de cuves, et de 3°C celle des soudures*, la RTNDT étant le paramètre retenu pour évaluer la fragilisation. *Cette augmentation pourrait avoir un impact sur la durée de fonctionnement des réacteurs*

(...) *L'IRSN a contesté l'emploi d'un facteur correctif majorant la ténacité de l'acier de cuve*. Ce facteur a été introduit par EDF pour tenir compte de l'existence d'un effet d'échelle lié aux différences dimensionnelles entre les défauts présents ou potentiellement présents dans la cuve et ceux présents dans les éprouvettes servant à mesurer la ténacité. Si l'IRSN admet l'existence de cet effet d'échelle, il considère que son évaluation est contestable et qu'*une estimation adéquate pourrait même conduire à minorer la ténacité au lieu de la majorer*. Par ailleurs, l'IRSN considère que la courbe de ténacité de référence tient déjà compte de l'effet d'échelle. Enfin, l'analyse a montré que cette courbe constitue une limite inférieure des résultats du PSI.

Les études mécaniques présentées par EDF ont été reprises par l'IRSN sans ce facteur correctif, en supposant une fragilisation plus importante que celle retenue par EDF. Dans ces conditions, *certaines cuves ne respecteraient pas complètement les exigences de la démonstration de sûreté (marges par rapport au risque de rupture brutale)* ».

2. risques et sûreté nucléaires à Fessenheim

2.2. les risques de la prolongation d'exploitation

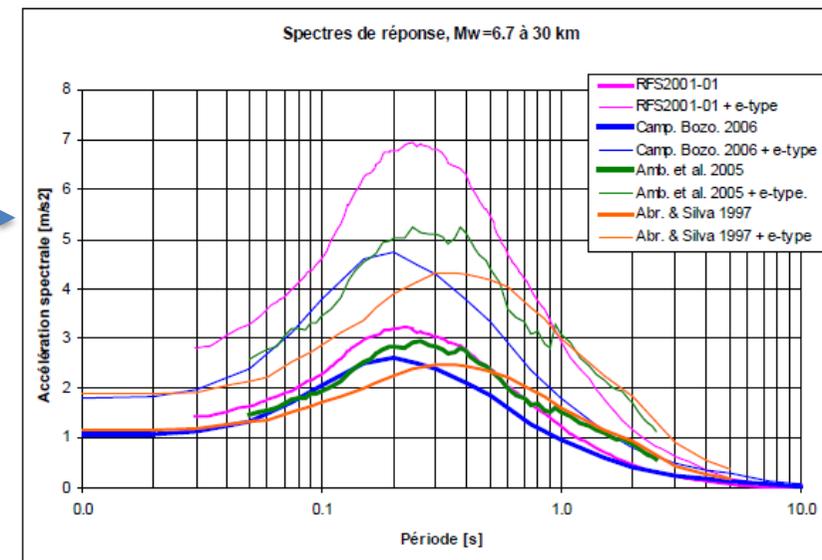
2.2.2. le risque sismique

- **séisme historique de Bâle (1356)**

- études dispersées sur la magnitude M_s (6,0 – 7,0) et la distance nord de la ZS à la CN (10 à 40 km)
- relations d'atténuation et spectres de réponse très dispersés selon les études (*figure ci-contre*)
- nécessité de prendre en compte les séismes locaux et l'aléa d'orientation des failles
- possibilité d'amplification locale de structure du sous-sol détectée mais incertaine
- nécessité de renforcement important et de relèvement des digues du canal d'Alsace

- **mesures post-Fukushima**

- renforcement des résistances des équipements au SMS (séisme majoré de sécurité $M_{SMS} = \text{Séisme maximal historiquement vraisemblable } M_{SMHV} + 0,5$)
- *mise à l'arrêt automatique des réacteurs envisagée par l'ASN (discutable selon EDF):* déformation-blocage des BC? →
- *renforcement des ancrages des équipement primaires*
- *mesures draconiennes anti-inondation: pompage nappe?*



« incident » du 9 avril 2014
débordement de 3 m³ d'eau → tableau indicateur
position des grappes de commande → arrêt urgence
par borification → découplage du réseau dangereux

2. risques et sûreté nucléaires à Fessenheim

2.2. les risques de la prolongation d'exploitation

2.2.3. les générateurs de vapeur de FES1 et FES2

- anomalies de fabrication des fonds de cuve EPR et GV fin 2014
 - ségrégation carbone très élevées jusqu'à 0,39%
 - ▶ *abaissement de la ténacité et de la RT_{NDT}*
 - ▶ *risque de rupture brutale par choc thermique*
 - arrêt de 12 réacteurs dont Fessenheim 1
 - redémarrage de FES1 en décembre 2016 en mode compensatoire (fonctionnement dégradé):
 - *prévention des chocs thermiques*
 - *réduction des vitesses de refroidissement/réchauffement de 55°C/h à 14°C/h*
 - *limitation à 15°C de l'écart des températures de l'eau d'injection aux joints des GMPP et du refoulement de RRA si les pompes primaires sont arrêtées*
- anomalies de fabrication de la virole basse n°335 du GV2 de FES2
 - audit Creusot par ASN après la découverte des 87 anomalies
 - ⇒ *chutage masselotte insuffisant de la partie ségrégée lors du forgeage*
 - GV n°3 installé depuis 2011
 - la virole aurait dû être éliminée
 - falsification des pièces par Creusot
 - arrêt du réacteur FES2 (13-06-2016)
 - suspension certificat d'épreuve du GV3 (18-07-2016)



ORIGINE Origin	<input type="checkbox"/> Fournisseur Supplier	<input type="checkbox"/> Client Customer	Client Customer : AREVA
			Projet project GV RB III
Matière Material	Identification / N° de coulée Marking / Heat N°		Désignation, pièce ou sous en VIROLE basse 335
1.4 MDO	Z 5433		Stade de fabrication Operation manual forgeage
Détection detection	<input type="checkbox"/> Annexes Annex		
Date : 09/12/2008			
Date : 09/12/2008	D1 CARACTERISTIQUE DE L'ECART Description of the discrepancy		
Impossibilité de couper la chute tête longueur trop juste environ manque environ 400			
<input type="checkbox"/> SANS FNC No NCR			
D3 TRAITEMENT DE L'ECART / ACTIONS A ENTREPRENDRE Treatment of the discrepancy / Actions to be performed			
SOLUTIONS / ACTIONS A ENTREPRENDRE Resolution / Actions to be performed			Resp. Person(s) in charge
Poursuivre la fabrication			■
Prevenir le CA lors du traçage pour déterminer les suites à donner.			

2. risques et sûreté nucléaires à Fessenheim

2.2. les risques de la prolongation d'exploitation

2.2.3. les générateurs de vapeur de FES1 et FES2 (2)

- instruction du dossier de la virole basse n°335 du GV3 par l'IRSN / ASN
 - ▶ *levée par l'ASN de la suspension du certificat d'épreuve le 12 mars 2018 (3 mois avant les 2 ans d'arrêt le 12 juin)*
- rappel LTEPCV: « Art. L. 593-24. -Si une installation nucléaire de base cesse de fonctionner pendant une durée continue supérieure à deux ans, son arrêt est réputé définitif. »
- analyse de l'avis IRSN /2018-00011 du 18 janvier 2018
 - **viroles sacrificielles non représentatives**: 1°) n'ont pas été forgées en même temps ni dans les mêmes conditions que la virole basse 335; 2°) dispersions de caractéristiques et de ségrégation très importantes
 - « *la teneur en carbone varie significativement le long de la circonférence des viroles sacrificielles, ainsi que d'une virole à l'autre* »
 - « *les données recueillies ne permettent donc pas d'apprécier la variabilité de propriétés entre les pièces forgées. La connaissance des propriétés mécaniques de la zone macroségrégée en tête des lingots creux [est] par ailleurs très faible* »
 - « *l'IRSN relève l'observation de plusieurs cas de rupture intergranulaire à 0°C sur des éprouvettes de Charpy V (mesure de résilience) prélevées en zone ségrégée* » ▶ **risque rupture de choc thermique sous pression des zones fortement ségrégées (0,39% → ΔRT_{NDT} de +110°C)**
 - « *l'IRSN estime que la démarche de caractérisation des propriétés du matériau dans la zone en anomalie est insuffisante* » et « *ceci ne remet pas en cause le caractère représentatif des deux viroles* »? (contradiction)

2. risques et sûreté nucléaires à Fessenheim

2.2. les risques de la prolongation d'exploitation

2.2.3. les générateurs de vapeur de FES1 et FES2 (3)

- analyse des avis IRSN /2018-00011 du 18 janvier 2018 (suite)
 - « L'IRSN recommande qu'AREVA NP mesure, sous six mois, les propriétés de ténacité dans la zone ségrégée de la VB 335-B, au moyen d'éprouvettes CT prélevées dans cette zone, afin de vérifier l'absence d'impact du comportement singulier observé sur les résultats d'éprouvettes de résilience. L'IRSN recommande en outre que des investigations expérimentales complémentaires soient réalisées, sous six mois, en zone ségrégée de la VB 335-B, afin d'expliquer l'apparition de faciès de rupture intergranulaire sur des éprouvettes Charpy V à 0°C. » (en un mois Areva aurait eu le temps de vérifier l'absence d'impact du comportement anormal des éprouvettes de résilience sur le comportement des viroles en cas de choc thermique? et d'expliquer un problème aussi difficile que l'apparition de profils de rupture intergranulaires à 0°C sur les éprouvettes Charpy qui relèverait en temps normal d'un véritable travail de re-cherche multifactoriel?)
 - « L'IRSN recommande qu'AREVA NP définisse la RT_{NDT} d'indexation de la courbe ZG pour les analyses de rupture brutale en intégrant un facteur de transposition supérieur ou égal à la différence de RT_{NDT} entre zone de recette et zone ségrégée, la plus élevée des deux viroles sacrificielles VB 335-B et VB 335-C. Le cas échéant, AREVA NP devra reprendre les analyses de rupture brutale en préalable à la levée de la suspension du certificat d'épreuve. » Le fait-même qu'Areva n'ait pas établi de facteur de transposition (c'est à dire un coefficient de sécurité de marge d'erreur et d'extrapolation) des résultats obtenus sur les viroles sacrificielles à la virole 335 du GV3 est proprement scandaleux et irresponsable, tout comme le passage sous silence des anomalies qu'elle connaissait.

2. risques et sûreté nucléaires à Fessenheim

2.2. les risques de la prolongation d'exploitation

2.2.3. les générateurs de vapeur de FES1 et FES2 (3)

- analyse de l'avis IRSN /2018-00006 du 9 janvier 2018
 - examens non destructifs mené par EDF
 - ⇒ zone ségrégée en carbone : proche de la paroi interne et de la soudure de la virole supérieure
 - ⇒ **risque de rupture brutale par choc thermique froid sous pression plus grand (« combinaison pénalisante »).**
 - simulations numériques par EDF
 - ⇒ « l'identification puis la caractérisation des transitoires thermo-hydrauliques de chocs froids pénalisants » .
 - l'IRSN reproche à EDF de ne pas avoir étudié deux cas limites très pénalisants (brusque et longue injection d'eau froide dans le tore noyé ; idem mais sous haute pression dans le tore dénoyé)
 - ⇒ **« l'IRSN considère que l'exhaustivité de la liste des situations prises en compte dans le dossier d'EDF n'est pas acquise »** (remarque totalement justifiée)
 - logiciel ANETH utilisé par EDF:
 - ⇒ semble présenter des lacunes et ne semble pas validé par l'expérience (pas de recalage suffisant des paramètres sur les résultats expérimentaux suffisamment représentatifs indépendants)
 - ⇒ **« Le caractère enveloppe des gradients de température calculés par ce logiciel n'est donc pour l'IRSN pas établi »**
 - ⇒ il est très surprenant et inconséquent qu'EDF ait adopté une modélisation monodimensionnelle, c'est-à-dire uniquement dans le sens de l'épaisseur du matériau mais pas transversalement, comme s'il n'y avait aucun effet latéral dans l'apparition des contraintes et la propagation des fissures, et que le matériau était homogène (ce qui n'est évidemment pas le cas du fait de l'existence des ségrégations carbone).

2. risques et sûreté nucléaires à Fessenheim

2.2. les risques de la prolongation d'exploitation

2.2.3. les générateurs de vapeur de FES1 et FES2 (3)

- analyse de l'avis IRSN /2018-00006 du 9 janvier 2018 (2)
 - logiciel ANETH utilisé par EDF (*suite*):
 - ⇒ « *compte tenu des réserves de l'IRSN quant à la caractérisation de certaines situations de catégorie 2, EDF a complété son dossier en fin d'instruction par la réalisation de calculs mécaniques prenant en compte des chargements thermo-hydrauliques découplés et pénalisants. Il s'agit de chocs froids instantanés à une pression de 1 bar et à une température initiale de 100 °C, la température finale variant de 50 °C à 7 °C. Il est également fait l'hypothèse d'un échange parfait entre le fluide et la paroi* » Le choix inadapté à l'enveloppe réelle des situations extrêmes (haute pression, température initiale à 7°C en injection, couche limite thermique, déphasage, constantes de temps pendant le transitoire)
 - ⇒ « *l'IRSN n'a pas l'assurance du caractère conservatif des corrélations utilisées pour le calcul du réchauffement du jet d'eau froide issue de l'ASG dans la vapeur environnante (qui conditionne la température du fluide en contact avec la virole)* ». Les corrélations stationnaires (relations mathématiques moyennes entre nombres adimensionnels de Nusselt, Reynolds, Rayleigh, Prandtl) utilisées par ANETH pour le calcul du réchauffement du jet froid dans la vapeur (en cas de dénoyage) ne sont pas scientifiquement valides en régime transitoire brusque, pas plus que l'utilisation de « *coefficients d'échange entre le fluide et la virole* »
 - ⇒ « *les coefficients d'échange entre le fluide et la virole considérés dans les études mécaniques prennent en compte des conservatismes importants* » et « *Ces études supplémentaires, démontrant la robustesse de la zone affectée par la ségrégation vis-à-vis du risque de rupture brutale suite à un choc froid, permettent de couvrir les réserves susmentionnées quant à l'exhaustivité des situations et la caractérisation de certaines situations de catégorie 2* ». Conclusions très indulgentes et passablement permissives pour un organisme scientifique censé garantir la sûreté nucléaire

Conclusions

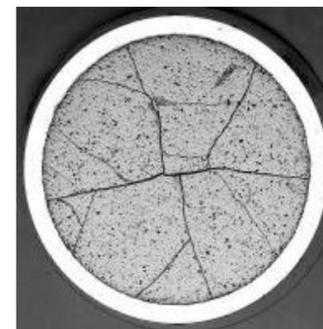
- dossier de validation du GV3 par l'IRSN-ASN complaisant (arrêt FES2 < 2 ans): *perte de crédibilité de l'Autorité*
- *pas de garantie solide de protection contre le risque de rupture brutale*

2. risques et sûreté nucléaires à Fessenheim

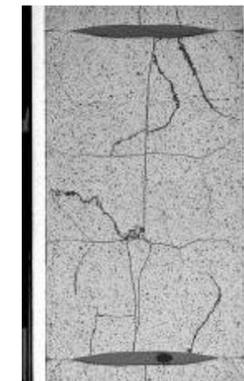
2.2. les risques de la prolongation d'exploitation

2.2.4. l'usure des gaines des barres de combustible

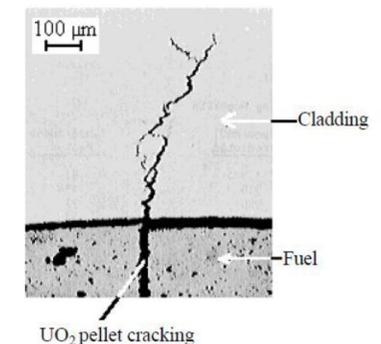
- **mode de suivi de charge risqué**
 - accroissement du taux de fissures des pastilles UO_2
 - apparition de fissures dans les gaines en zircalloy 4 des barres de combustible
 - **contamination accrue du circuit primaire**
 - **risque de passage d'éléments radioactifs dans les circuits de délestage primaire**
 - fatigue thermique accrue des aciers (cuve, conduits, boulons, raccords)
 - **arrêt Brockdorf (février 2017)?**



(a)
Transversal macrograph of a fuel rod irradiated for two annual PWR operating cycles



(b)
Axial macrograph of a fuel rod irradiated for two annual PWR operating cycles



(c)
Stress corrosion cracking (SCC) cladding failure

2. risques et sûreté nucléaires à Fessenheim

2.2. les risques de la prolongation d'exploitation

2.2.5. radier et récupérateur de corium

- **modifications des radiers FES1 et FES2 (2012)**

→ percée 1,5 m de béton par le corium < 24h

- **renforcement du radier +50 cm**
- **surface d'étalement dans le puits de cuve à sec**

⇒ **durée supplémentaire de percée 44h**

⇒ **éviter la présence d'eau, défavorable à l'étalement du corium**

⇒ **accroissement de la production de H₂ (interaction corium-béton + corium-eau)**

⇒ **risque d'explosion du bâtiment réacteur accru**

Conclusion

- **le risque de contamination de la nappe phréatique rhénane n'est pas éliminé mais simplement retardé**
- **il n'est pas exclu que l'explosion hydrogène soit favorisée par le dispositif d'étalement**

3. fermer Fessenheim: un enjeu local, national et international

3.1. un enjeu local

- **sécurité des populations de la plaine rhénane**
 - évitement de l'accident majeur, parfaitement plausible
 - **conjonction de causes humaines (erreurs), techniques (fuites, pannes, court-circuits) et naturelles (séisme, inondations, foudre)**
 - **perte de contrôle de la réaction en chaîne (blocage des barres de contrôle, déformation des gaines, rupture de conduite primaire ou de GV), refroidissement brutal avec rupture de cuve**
 - évitement des émissions radioactives lors des arrêts-redémarrages
 - bénéfique biologique de l'arrêt du réchauffement du canal d'Alsace
- **préparation de la transition énergétique locale**
 - création massive d'emplois dans les réseaux énergétiques intelligents, le stockage énergétique, les renouvelables
 - mise en place des formations techniques et scientifiques locales pour la transition énergétique
 - mise en place du démantèlement scientifique
 - mise en œuvre du démantèlement industriel

3. fermer Fessenheim: un enjeu local, national et international

3.2. un enjeu national

- **début de l'arrêt programmé des réacteurs nucléaires du palier CP0 puis CP1**
 - nécessaire à l'injection massive des ENR électriques
 - nécessaire aux réseaux énergétiques intelligents couplés avec stockage
 - évitement de la modulation de suivi de charge des réacteurs nucléaires
 - orientation des investissements massifs dans l'efficacité, la sobriété, les ENR
 - amélioration de l'état financier d'EDF (évitement de l'EPR et du recarénage, remontée du prix du kWh)
 - arrêt du chauffage électrique
 - baisse simultanée et planifiée du nucléaire à 50% d'ici 2028 (fermeture de 18 réacteurs)
- **mise en place des systèmes énergétiques intelligents (Smart Energy Systems)**
 - création massive des réseaux couplés électricité, chaleur, froid, gaz
 - généralisation de la cogénération biomasse-biogaz-H₂
 - généralisation des réseaux de chaleur biomasse-biogaz-solaire-géothermie
- **arrêt planifié des réacteurs nucléaires des autres paliers**
 - investissement dans les stockages saisonniers
 - investissement dans les technologies renouvelables et électriques de pointe (photovoltaïque du futur, mer, batteries flow-redox, microalgues)
 - baisse simultanée et planifiée du nucléaire à 30% d'ici 2035 (fermeture de 16 réacteurs supplémentaires)
 - sortie possible du nucléaire avant 2050

3. fermer Fessenheim: un enjeu local, national et international

3.3. un enjeu international

- **protection des populations allemandes, françaises et suisses**
- **préservation de la nappe phréatique rhénane**
- **démonstration de la faisabilité de la transition énergétique européenne**
 - planifications concertées et démocratiques Allemagne-France-Suisse
 - interconnexion des réseaux électriques et gaz accrue
 - co-développement de solutions renouvelables efficaces
 - interconnexions accrues des transports en commun et des transports doux (pistes cyclables)
 - économies d'échelle pour la production de systèmes industriels de stockage énergétique, de production ENR
 - mise en commun des expériences de démantèlement nucléaire
 - baisse simultanée et planifiée du nucléaire en Europe

4. après la fermeture de Fessenheim: propositions

4.1. à court terme

- **renforcement des digues amont et aval du grand canal d'Alsace**
- **création d'une zone de démantèlement industriel de FES1 et FES2**
 - création d'une zone de déconstruction-recyclage des équipements non radioactifs
 - préparation des silos de stockage protégé des déchets de démantèlement des GV, équipements primaires radioactifs
 - évacuation des barres de combustibles
- **création d'un centre de recherche et d'analyse physico-chimique des cuves irradiées**
 - mesures fines et non destructive de l'acier et du revêtement inox des deux cuves par diverses méthodes de mesure physique et chimique aux échelles millimétriques, micrométriques et nanométriques
 - ouverture de coopérations internationales Interreg, Feder, etc. sur l'étude des aciers irradiés entre les laboratoires de recherche de Strasbourg, Mulhouse, Fribourg, Bâle et au-delà
 - extension aux démantèlements des réacteurs allemands et suisses
- **création d'un centre de développement des réseaux énergétiques intelligents SES**
 - station de cogénération biogaz
 - centre de production hydrogène par électrolyseurs PEMFC/SOFC couplés à un réseau de chaleur
 - station de méthanation (réaction exothermique) couplée à la station biogaz et au réseau de chaleur
 - centrale solaire photovoltaïque haute performance
 - centrale solaire thermique couplée au réseau de chaleur avec stockage thermique mensuel/saisonnier
 - Centre de Pilotage intelligent automatisé des réseaux couplés (architecture bioclimatique)

4. après la fermeture de Fessenheim: propositions

4.2. à moyen et long terme

- **centre de formation international aux systèmes énergétiques intelligents SES**
- **coopération transfrontalière des transports collectifs**
 - lignes ferroviaires + tram + vélo transfrontalières
 - gestion énergétique haute performance des réseaux de transport
- **coopératives énergétiques renouvelables transfrontalières**
 - mise en place de structures financières coopératives transfrontalières et européennes
 - développement des réseaux coopératifs énergétiques transfrontalières et européennes
- **développement des villes intelligentes soutenables**
 - coopération, échanges, retour d'expérience entre métropoles rhénanes et européennes (Smart Cities)
 - bourses d'échange et de formation étudiantes transfrontalières et européennes sur les SES
- **développement des réseaux de production agricole soutenable transfrontaliers**
 - réseaux coopératifs d'agriculture et de cantines biologiques
 - coopération transfrontalière de recherche agrobiologique, agroforesterie
 - bourses d'études transfrontalières et européennes



définitions et mesures physique nucléaire et radiologie

• unités d'énergie et de puissance

préfixes:

k (kilo) $\equiv 10^3$
M (méga) $\equiv 10^6$
G (giga) $\equiv 10^9$
T (téra) $\equiv 10^{12}$
P (péta) $\equiv 10^{15}$
E (exa) $\equiv 10^{18}$

énergie :

1 J $\equiv 1$ N m
1 kWh $\equiv 3,6$ MJ
1 TWh $\equiv 3,6$ PJ
1 TJ $\equiv 0,278$ GWh
1 PJ $\equiv 0,278$ TWh
1 tep $\equiv 11625$ kWh
1 TWh $\equiv 0,0860$ Mtep

• unités physiques en radiologie

A : activité radioactive (becquerel Bq) \equiv désintégrations nucléaires par seconde (ancienne unité: le curie (Ci) $\equiv 37$ GBq)

e_a : dose radioactive absorbée (gray Gy) \equiv énergie massique absorbée (1 Gy $\equiv 1$ J kg⁻¹ ; ancienne unité: le rad; 1 Gy = 100 rad)

e_{eq} = e_a × Q : dose équivalente absorbée (sievert Sv) \equiv dose absorbée biologiquement amplifiée selon la nature des rayonnements absorbés Q(α) = 20; Q(β,γ) = 1; 5 < Q(n) < 20 (ancienne unité: le rem ; 1 Sv $\equiv 100$ rem)

effets biologiques

doses mortelles indicatives : e_a > 5 Gy ; e_{eq} > 10 Sv

relation dose équivalente – activité : dépend de l'organe, de l'exposition (interne, externe)

cancers induits : loi de proportionnalité sans seuil à la dose équivalente

radioactivité naturelle (géologique + cosmique): 2,45 mSv/an (France); max 50 mSv/an (Inde)

limites légales en France : public 1mSv/an (0,114 μSv/h); travailleurs nucléaires 20 mSv/an

• unités en physique nucléaire

A_ZX : noyau atomique (n° atomique Z protons; nombre de masse A = Z protons + N neutrons)

TCT : taux de combustion thermique (MWj/t) \equiv énergie thermique massique produite par fissions nucléaires dans un combustible nucléaire

W_{UTS} : unité de travail de séparation isotopique (UTS) \equiv masse d'uranium représentative du travail nécessaire pour produire 1 kg de combustible enrichi à x_e avec un rejet à x_r

σ : section efficace de réaction noyau-neutron (barn) \equiv surface d'interaction équivalente par noyau (1 barn $\equiv 10^{-24}$ cm²)

dpa : déplacement par atome \equiv nombre de noyaux déplacés par un atome par chocs successifs



Merci pour votre attention