

Club Mines - Energie

Ségrégation du carbone dans les aciers forgés

David Emond

Directeur de la BU Composants, AREVA NP

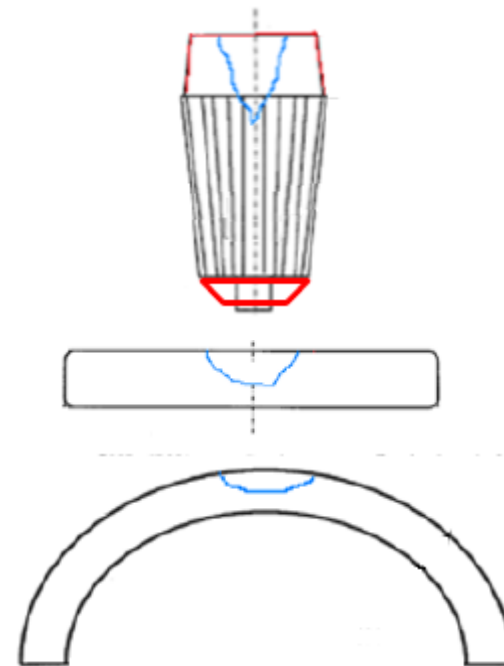
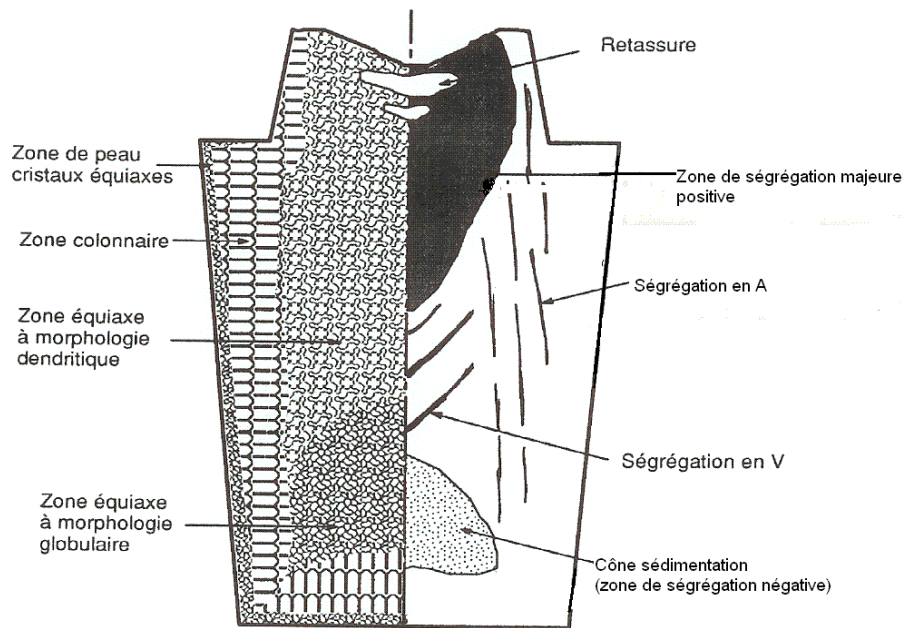
Le 20 Avril 2017

Un phénomène à maîtriser : la ségrégation du carbone

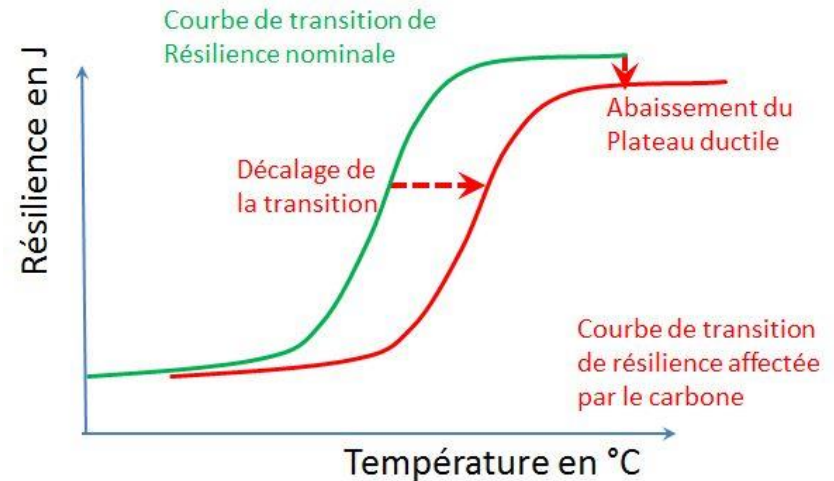
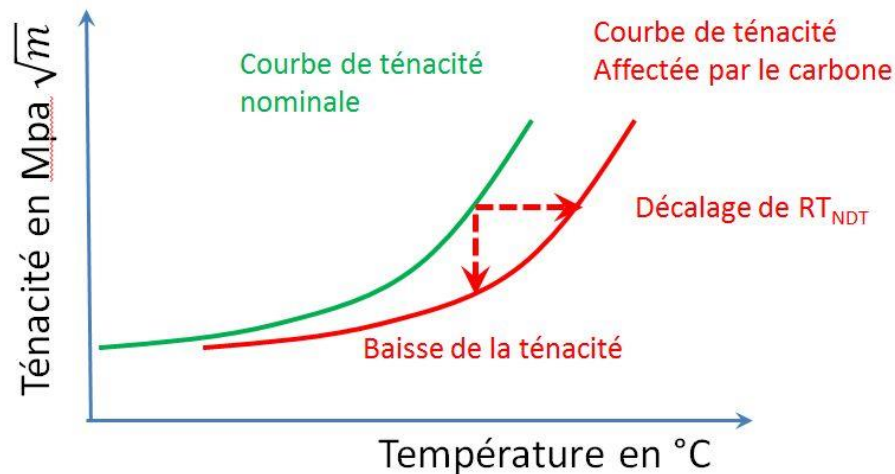
- ▶ **Le carbone est un élément essentiel dans les aciers
« au carbone »**
- ▶ **Sa présence conditionne de nombreuses propriétés de
l'acier :**
 - ◆ **Il durcit les aciers mais il les fragilise aussi**
 - ◆ **Il détermine la structure même de l'acier**
 - ◆ **Il participe à la faculté de l'acier à « prendre la trempe »**
- ▶ **Le phénomène de ségrégation du carbone conduit**
 - ◆ **À des hétérogénéités locales avec des propriétés locales différentes du
reste de la pièce (durcissement, fragilisation, modifications de structure)**

La ségrégation du carbone : un phénomène connu des métallurgistes

- ▶ Pendant la phase de solidification, dans la zone qui se refroidit le moins vite, le carbone migre vers le haut du lingot
- ▶ Le phénomène de ségrégation est plus marqué pour les lingots pleins dits « conventionnels »
- ▶ Plus les lingots sont gros plus ils y sont sensibles

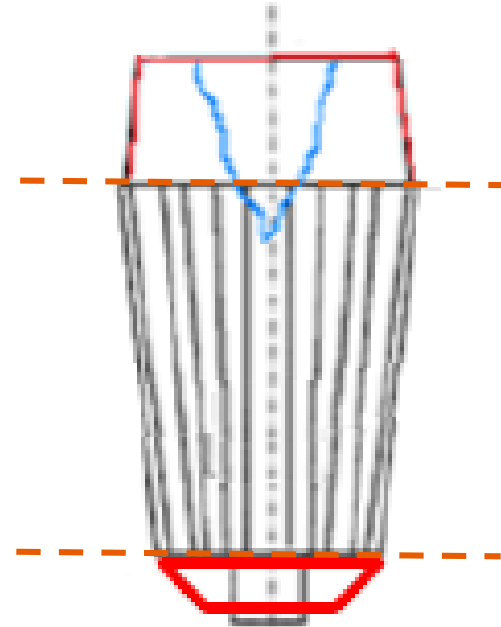


L'effet du carbone sur les caractéristiques mécaniques de rupture brutale



Les procédés pour éviter la ségrégation

- ▶ **Elimination de la tête et du pied du lingot : c'est l'opération de chutage**
- ▶ **L'utilisation de lingots à solidification dirigée ou de lingots creux permet de limiter de manière notable la ségrégation**



Exigences des règlements applicables aux équipements sous pression

- ▶ Les exigences concernent surtout les propriétés mécaniques.

- ★ **Code RCC-M** : Les propriétés mécaniques sont vérifiées aux emplacements représentatifs.

- ★ **Arrêté ESPN*** : Les propriétés mécaniques sont définies dans l'arrêté et doivent être vérifiées en tout point du composant.

** ESPN : Equipement Sous Pression Nucléaire*

- ▶ **Principe des qualifications techniques pour vérifier le respect des exigences dans le cadre d'une gamme de fabrication:**

- ◆ Pièces sacrificielles
- ◆ Vérification par de nombreux essais du respect des exigences au cœur de la pièce et sur les coupons de recette, avec un accent essentiellement mis sur les propriétés mécaniques (exigences réglementaires)
- ◆ Pour les pièces de série, les essais sont ensuite limités aux zones de recette

Exigences relatives au taux de carbone

▶ Exigences à la coulée de teneur maxi

- Pour du 18MND5 → nominal : 0,18% maximum 0,20%
- Vérifié par des mesures réalisées à la coulée

▶ Exigences du Code RCC-M

- Carbone maximum 0,22%
- Valeur historique jugée « raisonnable », pour prendre de la marge par rapport aux risques de fissuration à froid lors du soudage, par exemple dans le Code ASME le taux maxi est de 0,25%

▶ Interdiction de souder sur un acier à taux de carbone > 0,35% (A74)

- Mesures sur flan de type détrompeur → on ne soude pas sur la face qui contient le plus de carbone

▶ Exigences implicites sur les caractéristiques mécaniques

- Les caractéristiques mécaniques des pièces sacrificielles sont vérifiées dans l'axe

Historique de la cuve de l'EPR FA3 (1/2)

- ▶ **1980** : Développement du Lingot à Solidification Dirigée afin d'éliminer les ségrégations carbone
- ▶ **Années 1990 puis 2000** : Pour améliorer la sûreté, on supprime des soudures et on augmente la taille des lingots non compatible avec une fabrication LSD
- ▶ **2005** : Publication de l'arrêté ESPN
- ▶ **Juin 2006 – Janv 2007** : Coulées des calottes de cuve FA3
 - AREVA pense que la qualification M140 du RCCM répondra aux exigences ESPN et ne spécifie pas de contraintes sur la maîtrise de l'intensité de la ségrégation
- ▶ **Oct 2007 – dec 2007**: Expédition calottes ACF vers St Marcel
- ▶ **2008 – 2009** : Rapport de qualification M140

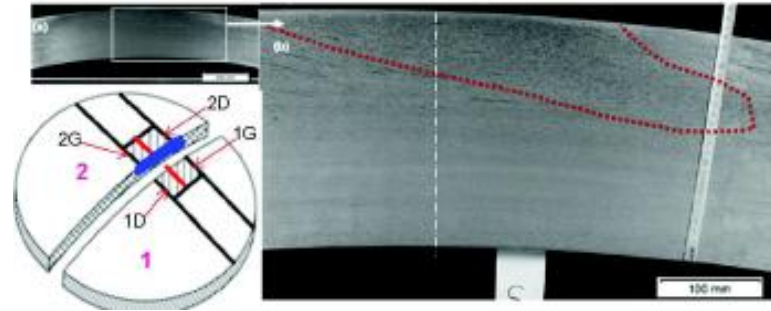
Historique de la cuve de l'EPR FA3 (2/2)

- ▶ **Novembre 2011** : L'ASN tranche un débat de fond en GP ESPN sur la « qualité attendue » : Les Exigences mécaniques sont à respecter en tout point des pièces et en valeur individuelle »
- ▶ **2012 – 2013** : Analyse d'antériorité sur FA3 « quels essais complémentaires sont à réaliser pour apporter le niveau de démonstration demandé par le GP 2011 - Des résultats favorables sur un fond de GV induisent les équipes Areva en erreur sur l'appréciation du risque ségrégation
- ▶ **6 septembre 2013** : Expédition du corps de cuve
- ▶ **Janvier 2014** : Installation de la cuve
- ▶ **Octobre 2014** : Les essais sur une carotte prélevée au centre d'une calotte UA montrent des caractéristiques mécaniques ne respectant pas les valeurs requises / Des taux de carbone de 0,28% sont mesurés
- ▶ **2015 – 2016** : Programme sacrificiel de 3 calottes

Le programme d'essais pour la cuve

▶ 3 calottes ont été sacrifiées

- ◆ La profondeur de la ségrégation a été caractérisée
- ◆ En fonction de cette caractérisation, essais sur 2 ou 3 altitudes dans chaque calotte

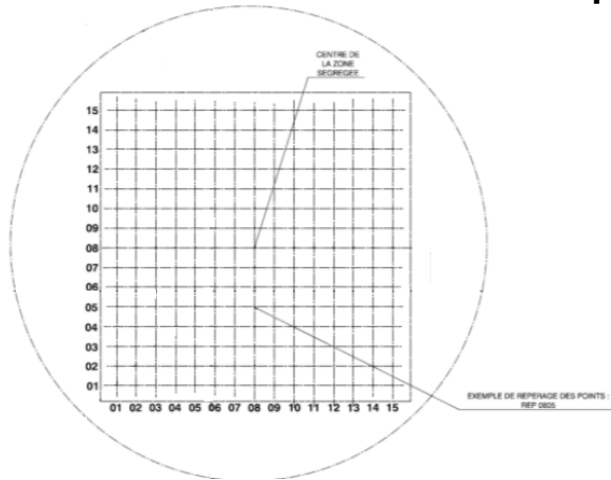


▶ Par altitude

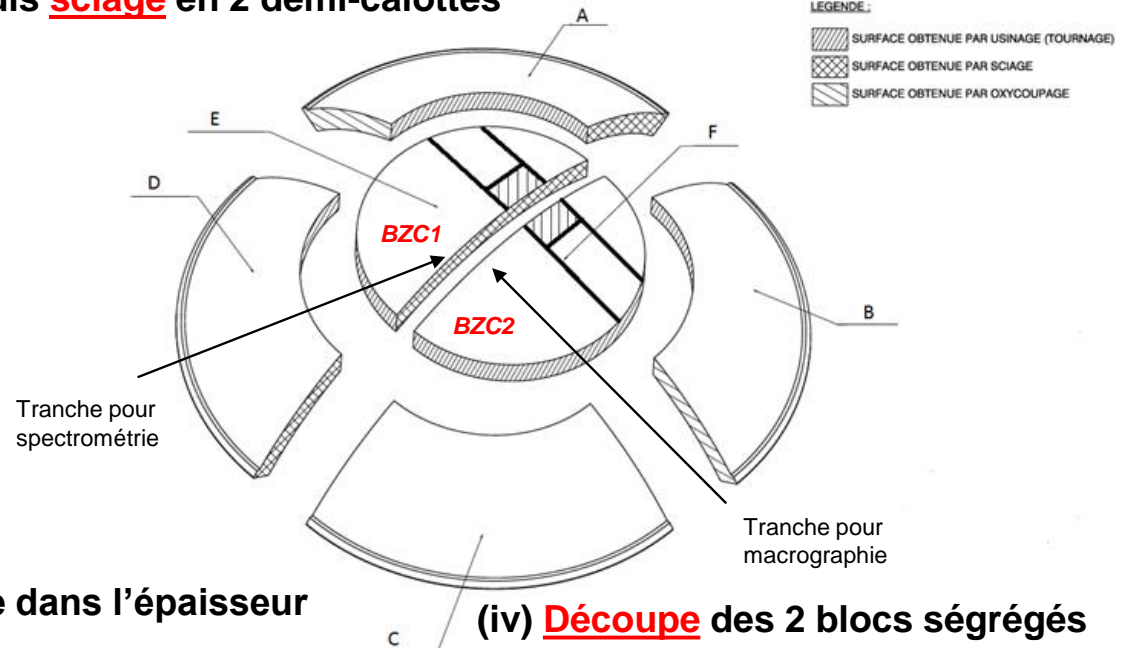
- ◆ Entre 70 et 140 essais de ténacité dans le domaine de la transition : plus de 800 essais en tout
- ◆ Au moins 10 essais de ténacité en déchirure ductile : plus de 100 essais en tout
- ◆ En complément : de traction, de résilience, Pellini : plus de 1700 essais en tout
- ◆ Mesure de la teneur en carbone de chaque éprouvette

Des calottes aux éprouvettes : La découpe des calottes

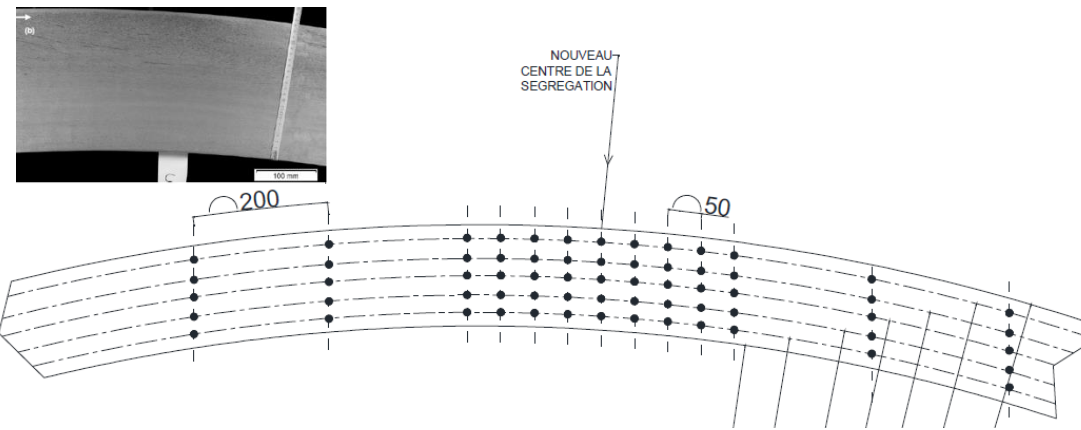
(i) **Cartographie** sur la surface externe



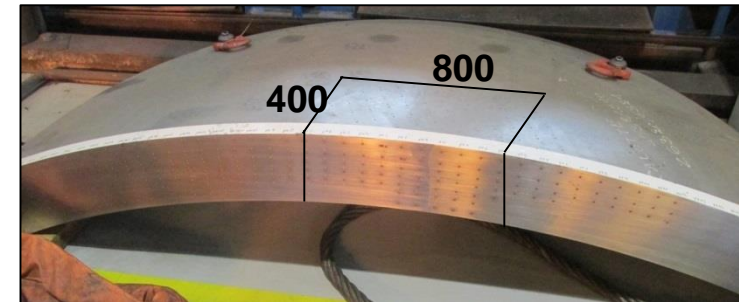
(ii) **Détourage** de la partie centrale par usinage puis **sciage** en 2 demi-calottes



(iii) **Cartographie** carbone + Macrographie dans l'épaisseur



(iv) **Découpe** des 2 blocs ségrégés



Le dossier de justification des calottes : les 4 piliers

Pas de défaut nocif

- Pas de défaut \perp à la peau (processus de fabrication)
- Défauts < 10 mm (perf. contrôle de fab.)
- Inspections complémentaires

Caractéristiques mécaniques de 3 calottes sacrificielles

- ◆ 98% des points de ténacité couverts par la RTndt de recette
- ◆ Comportement typique d'un 16MND5

Comparaison avec les calculs

- ◆ Identification des Marges

Représentativité

- ◆ # forge
- ◆ # trempe
- ◆ # mécaniques recette
- ◆ %C surface

Prochaine étape : GP ESPN mi 2017
AREVA NP

Le début de l'histoire pour les fonds primaires...

- ▶ **2006** : L'arrêté ESPN requiert la Qualification Techniques (QT) des pièces. La première réponse d'AREVA NP repose sur l'application du RCC-M qui impose lui-même une telle QT
- ▶ **2011** : Clarification par la Direction des Equipements sous Pression nucléaire (DEP) de la notion de QT, avec nécessité de fabriquer et sacrifier des pièces
- ▶ **2012** : QT des fonds de la cuve de Flamanville 3 – AREVA NP lance des essais destructifs sur un couvercle de cuve non utilisée
- ▶ **2014** : les essais mécaniques sur le couvercle révèlent des résultats de résiliences non conformes dus à la présence d'une ségrégation majeure positive de carbone
- ▶ **2015** : Un inventaire exhaustif des pièces forgées potentiellement concernées identifie les fonds primaires de GV issus de lingot conventionnels comme sensibles à la ségrégation majeure positive de carbone
- ▶ **2 forgerons sont concernés : Creusot Forge et JCFC**

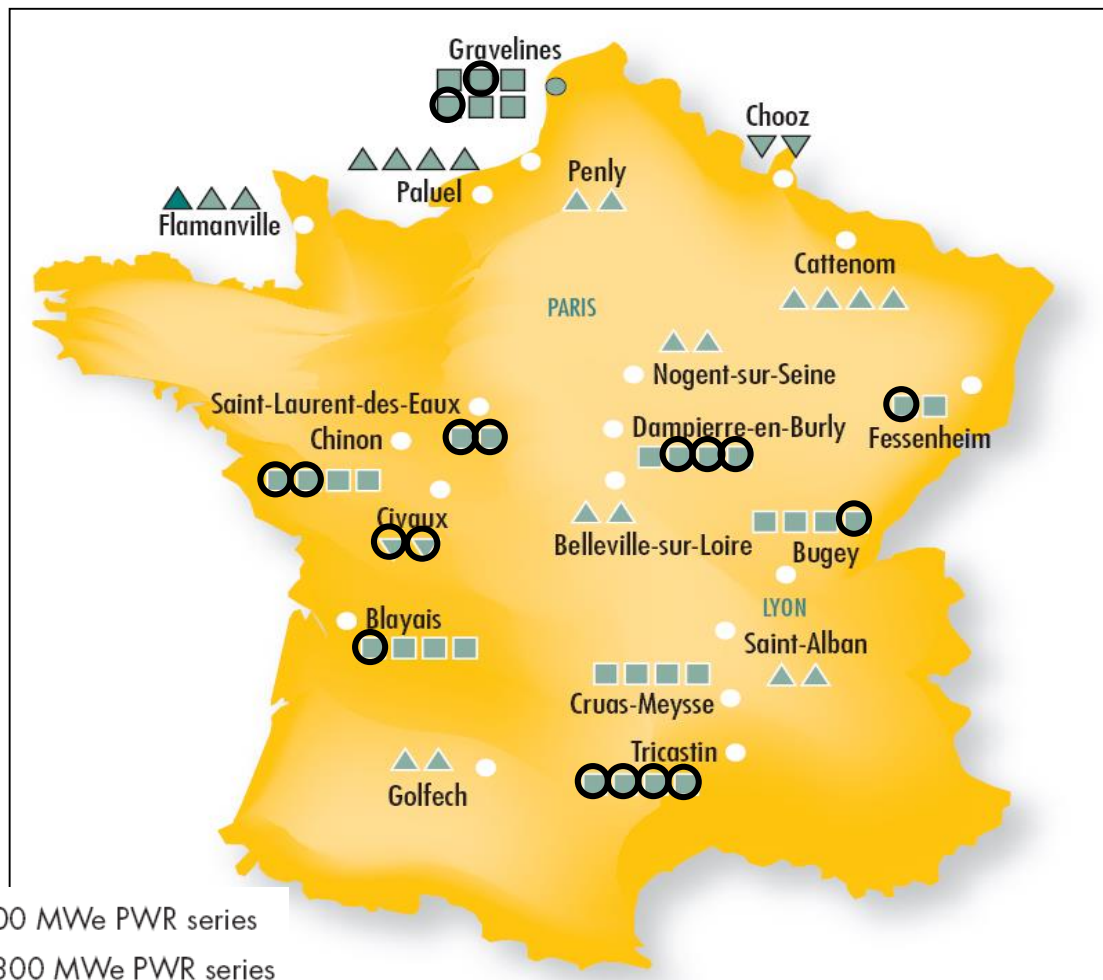
Les suites...

- ▶ **Immédiatement, une campagne de mesure est lancée sur les Fonds Primaires (FP) de 3 GV de remplacement en fabrication**
- ▶ **Confirmation d'un taux de carbone supérieur à l'attendu → les FP seront remplacés...**

- ▶ **2016 : Sur les GV en exploitation, d'autres mesures *in situ* suivront confirmant**
 - ◆ **Des FP issus de lingots CF autour de 0,30% maxi et parfois une ségrégation qui atteint les tubulures**
 - ◆ **Des FP issus de « petits » lingots JCFC dans la même gamme de carbone**
 - ◆ **Des FP issus des plus gros lingots de JCFC avec ponctuellement des valeurs proches de 0,40% de carbone**

18 tranches concernées

BLAYAIS 1
BUGEY 4
CHINON B1
CHINON B2
CIVAUX 1
CIVAUX 2
DAMPIERRE 2
DAMPIERRE 3
DAMPIERRE 4
FESSENHEIM 1
GRAVELINES 2
GRAVELINES 4
St LAURENT B1
St LAURENT B2
TRICASTIN 1
TRICASTIN 2
TRICASTIN 3
TRICASTIN 4



- 900 MWe PWR series
- ▲ 1300 MWe PWR series
- ▼ 1450 MWe PWR series
- ▲ 1600 MWe PWR series (under construction)

La stratégie de traitement

► **Dossiers de justification de redémarrage.**

- ◆ **Quand une tranche s'arrête pour maintenance, sont réalisés :**
 - Des mesures Spectrométrie à Etincelle Optique (SEO)
 - Des contrôles US
 - Des calculs de type « Rupture brutale » spécifique.
- ◆ **En complément à ces dossiers spécifiques à chaque tranche, engagement d'un programme d'expertise long terme pour caractériser la ségrégation dans les différents fonds.**

Démarche de justification

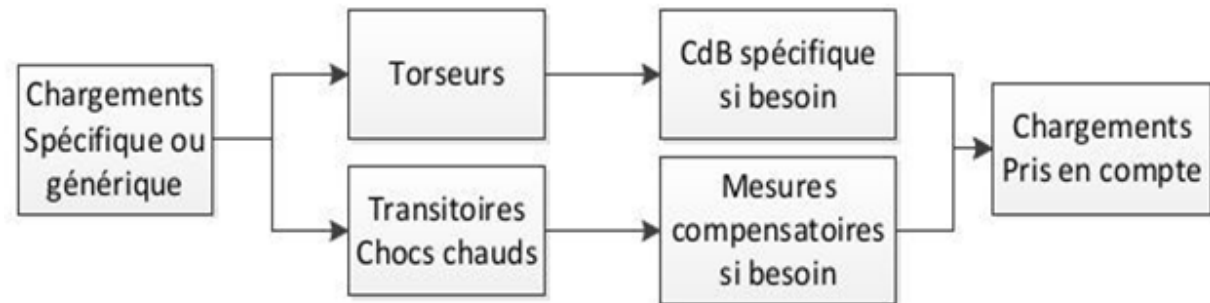
Une approche découplée (1/2)

- ▶ Un taux de carbone élevé a pour effet de diminuer les propriétés mécaniques de résilience (ou ténacité)
→ la tenue à la rupture brutale doit être vérifiée.

Dans l'attente d'une meilleure connaissance de l'impact du carbone sur les propriétés mécaniques, des valeurs **enveloppes** sont adoptées dans les dossiers.

Pour une étude de tenue à la rupture cela, nous avons donc besoin :

- ▶ Des chargements sur les bols de GV
 - ◆ Chocs chauds pour des défauts hypothétiques en peau externe du bol
 - ◆ Issus de transitoires adaptés au bol des GV
 - ◆ → adaptation parfois nécessaire de procédures de conduite

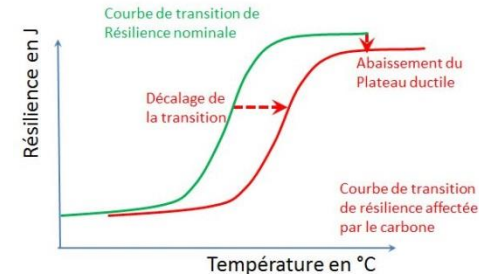


Démarche de justification

Une approche découplée (2/2)

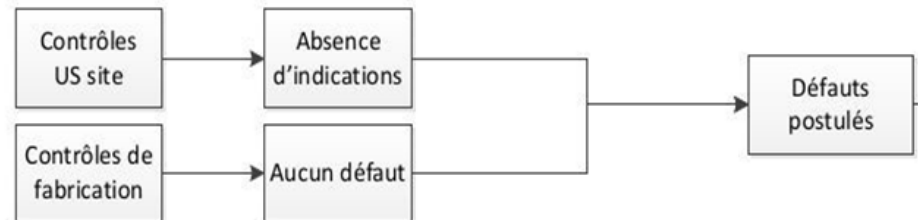
► De la connaissance de l'effet du carbone sur les propriétés mécaniques

- ◆ Approche découplée avec prise en compte d'un effet forfaitaire enveloppe du carbone sur la ténacité.
- ◆ → **Décalages très enveloppes postulés**



► De la connaissance des défauts potentiels

- ◆ Absence de défaut dans les forgés
- ◆ → **Défauts postulés (limite des CND)**



► De la connaissance de la localisation et de l'intensité de la ségrégation

- ◆ Mesures Spectromètre à Emission Optique
- ◆ Prélèvements de copeaux pour chimie dans certains cas



Résultats de mesures Carbone sur les fonds JCFC

- ▶ **Un taux de carbone particulièrement élevé mesuré en peau externe:**
 - ◆ **Suspicion de ségrégation traversant toute l'épaisseur de la pièce → Etude des chocs froids nécessaire (en plus des chocs chauds)**
 - ◆ **Connaissance insuffisante du comportement à la rupture brutale de aciers avec un taux de carbone ségrégré aussi élevé**

Compléments nécessaires pour les fonds JCFC

- ▶ **Quel est l'impact d'un taux de carbone élevé sur les propriétés mécaniques de rupture brutale?**
 - ◆ Peu de résultats, bibliographie pauvre
 - ◆ Lancement d'essais sur de la matière représentative
 - ◆ → **Des essais réalisés de manière réactive et des résultats rassurants**

- ▶ **L'étude des chocs froids doit être réalisée**

- ▶ **L'ASN a autorisé EDF à redémarrer les GV équipés de fonds JCFC, moyennant la fourniture de dossiers spécifiques pour chaque tranche.**

Les prochaines étapes pour les fonds primaires de GV

▶ A court terme → juin 2017

- ◆ Finaliser les essais de caractérisation de l'impact des forts taux de carbone

▶ A moyen terme → fin 2017

- ◆ Réaliser un nouveau programme paramétrique sur des lingots synthétiques pour compléter la caractérisation des propriétés des aciers à haut carbone

▶ A long terme → de 2 à 3 ans

- ◆ Réaliser le programme de pièces sacrificielles pour caractériser complètement la ségrégation et rétablir des marges, revenir, si cela est possible, sur les adaptations de conduite qui ont été nécessaires

AREVA NP

