



Présentation du programme d'essais des calottes sacrificielles

Département Matériaux PEEM-F, Ingénierie AREVA

RESTRICTED AREVA

The information in this document is AREVA property and is intended solely for the addressees.

Reproduction and distribution are prohibited. Thank you

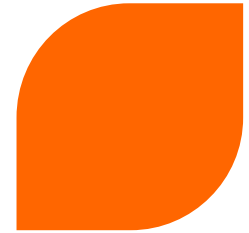
Engineering & Projects Organization

A
AREVA
forward-looking energy



- 1. Principe de mesure de la ténacité**
- 2. Le programme sacrificiel**
- 3. Choix des laboratoires**

1 – Principe de mesure de la ténacité



- ▶ **La sollicitation d'une fissure est quantifiée par un paramètre mécanique noté K_J ou J selon les cas (force fissurante)**

- ▶ **Dans la vie d'une fissure, on distingue deux stades**
 - ◆ L'amorçage : sollicitation à partir de la quelle la force fissurante est suffisante pour que le défaut commence à grandir
 - ◆ La propagation : la fissure s'agrandit – elle peut être instable (rupture du composant) ou stable (le composant résiste toujours suffisamment)

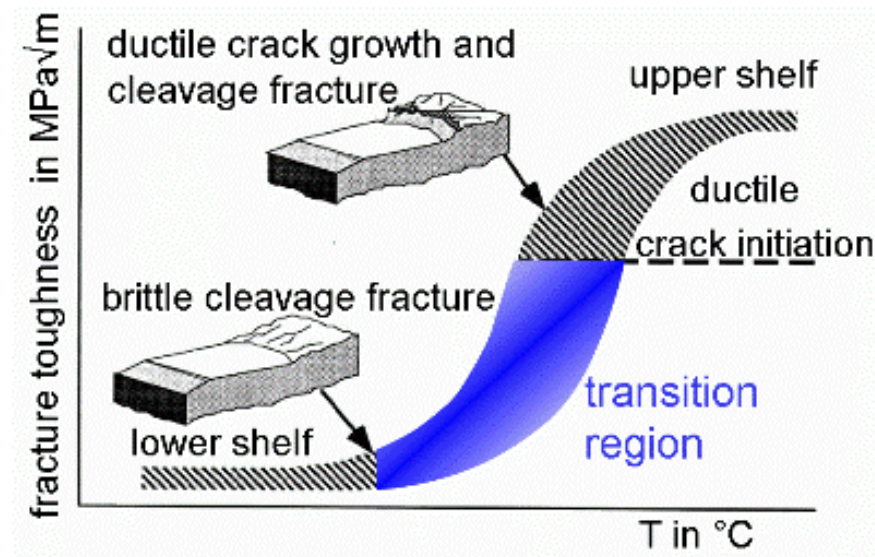
- ▶ **La ténacité de l'acier de cuve est la résistance à l'amorçage d'une fissure**

1 – Principe de mesure de la ténacité



► Les aciers de cuve présentent une transition fragile-ductile

- ◆ Rupture par clivage aux plus basses températures
- ◆ Rupture ductile aux plus hautes températures ('palier ductile')
- ◆ La transition est la plage de température où les deux phénomènes coexistent

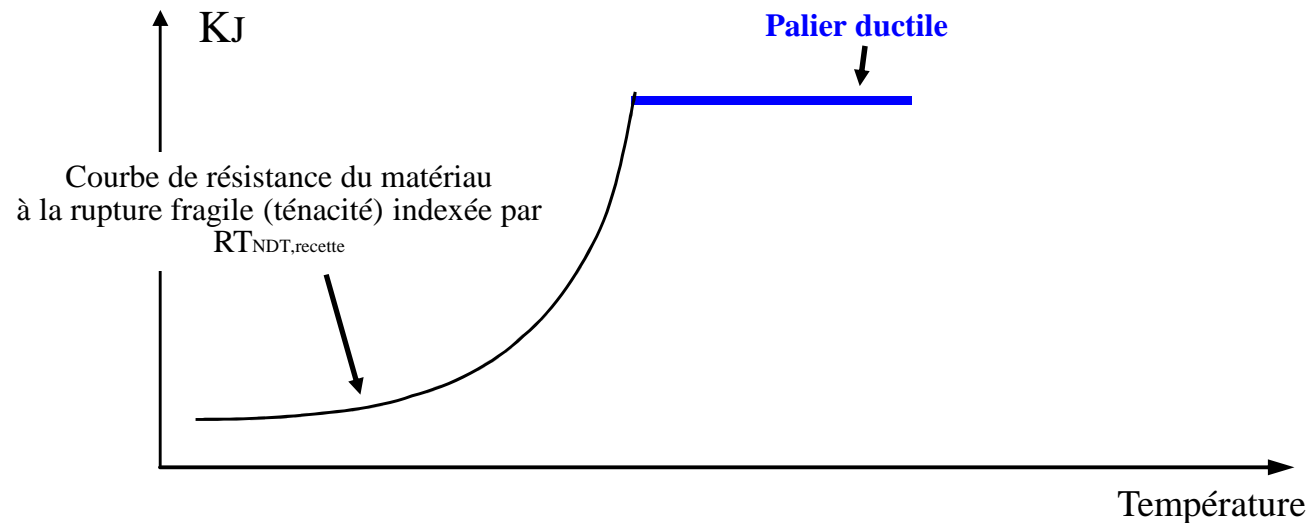


1 – Principe de mesure de la ténacité



► Les aciers de cuve présentent une transition fragile-ductile

- ◆ Rupture par clivage aux plus basses températures
- ◆ Rupture ductile aux plus hautes températures ('palier ductile')
- ◆ La transition est la plage de température où les deux phénomènes coexistent
- ◆ Pour les analyses, on décrit cette transition par :
 - Courbe enveloppe K_{Jc} (Température) pour le rupture par clivage
 - Scalaire $J_{0,2}$ pour caractériser le palier ductile



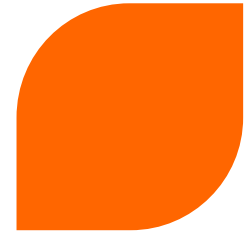
1 – Principe de mesure de la ténacité



- ▶ **Le dossier des calottes FA3 s'appuie sur la démonstration d'une ténacité suffisante en tout point des calottes**
 - ◆ Elle doit permettre d'assurer la tolérance des calottes aux grands défauts en toute circonstance

- ▶ **Pour les zones ségréguées, il faut donc :**
 - ◆ Evaluer la ténacité nécessaire pour assurer cette tolérance, avec les marges requises
 - ◆ Connaitre la ténacité dans les zones ségréguées aux différentes localisations : c'est l'objet du programme sacrificiel

1 – Principe de mesure de la ténacité



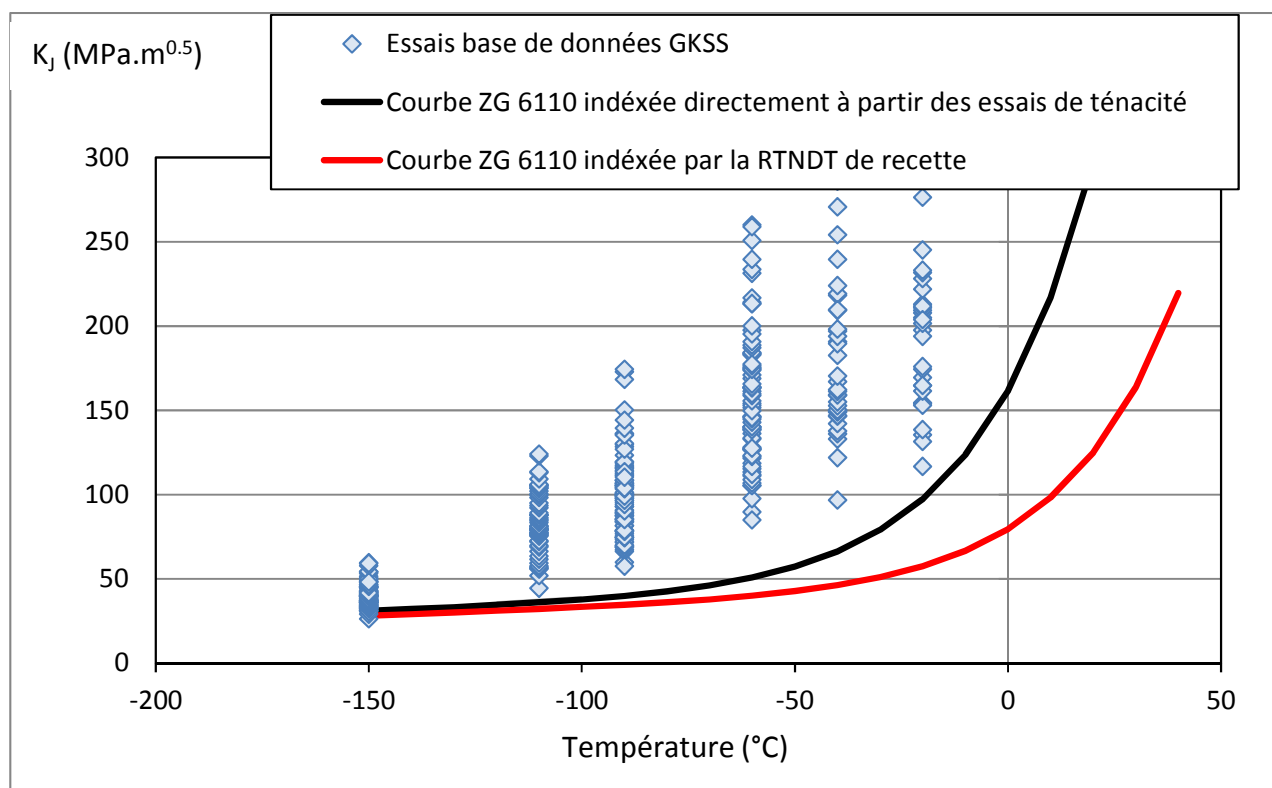
▶ En recette d'un produit, on ne mesure pas directement la ténacité

- ◆ Essais complexes et coûteux
- ◆ C'est pourquoi en général on se contente de vérifier indirectement cette caractéristique à partir d'essais de chocs (PELLINI & Résilience)

▶ La méthode indirecte est une solution simple de vérifier la conformité

- ◆ Essais simples et immédiats
- ◆ Permettent d'identifier la RTNDT utilisée pour indexer la courbe de ténacité du code (« courbe ZG »)
- ◆ Les règlements ne s'appuient également uniquement que sur la résilience
- ◆ Pour autant, ne pas respecter l'objectif de résilience n'indique pas nécessairement que la ténacité du matériau est insuffisante :
 - La RTNDT obtenue est une valeur enveloppe
 - dans ce cas, il faut passer par une caractérisation directe

1 – Principe de mesure de la ténacité

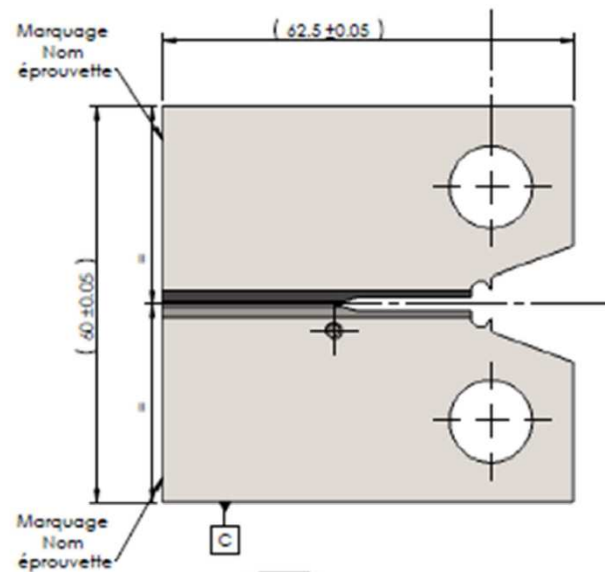
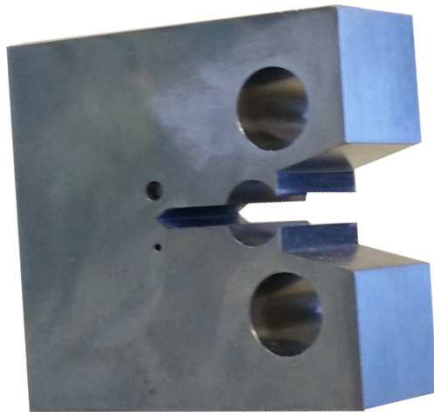


1 – Principe de mesure de la ténacité



- ▶ **Les essais de ténacité doivent caractériser les deux domaines**
 - ◆ Scalaire $J_{0.2}$ pour la déchirure ductile
 - ◆ Courbe enveloppe K_{Jc} (Température) pour le rupture par clivage

- ▶ **Ces essais sur réalisés sur des éprouvettes fissurées : les éprouvettes CT**



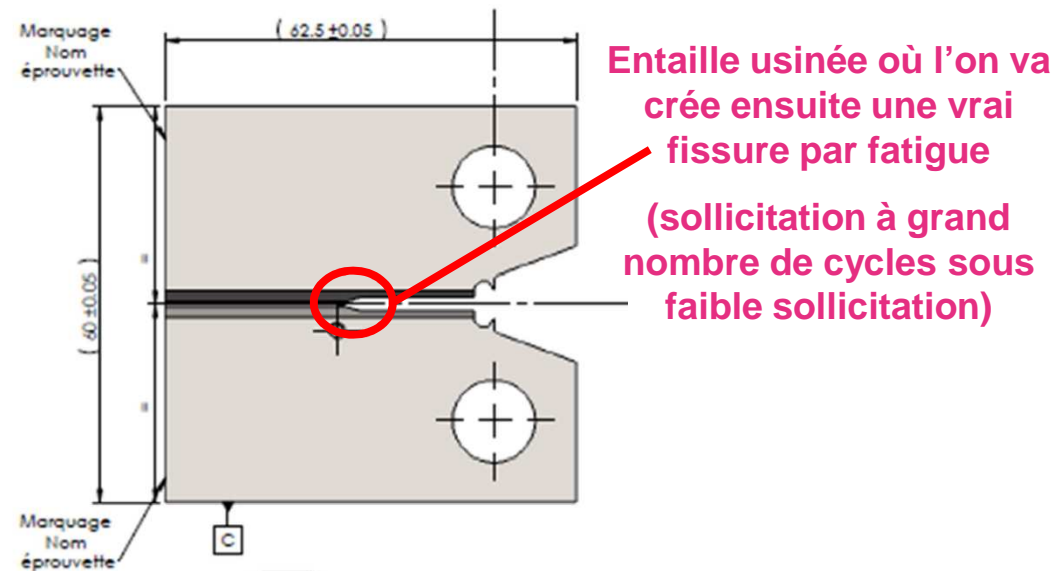
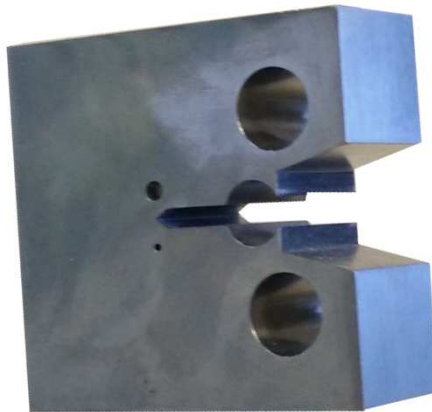
1 – Principe de mesure de la ténacité



► Les essais de ténacité doivent caractériser les deux domaines

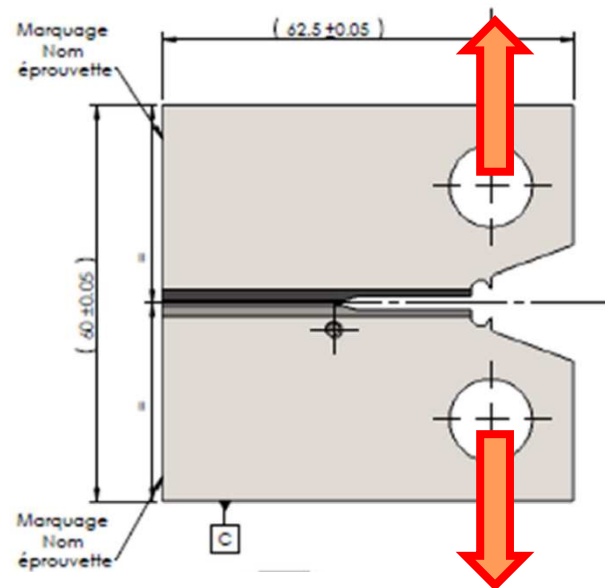
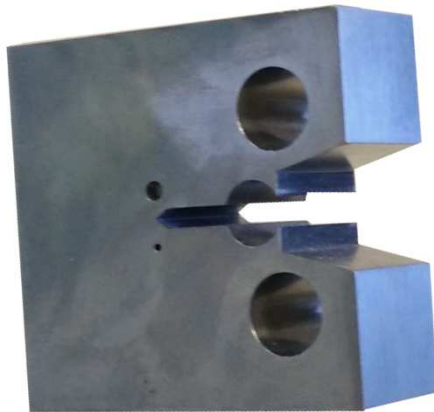
- ◆ Scalaire $J_{0.2}$ pour la déchirure ductile
- ◆ Courbe enveloppe K_{Jc} (Température) pour le rupture par clivage

► Ces essais sur réalisés sur des éprouvettes fissurées : les éprouvettes CT



1 – Principe de mesure de la ténacité

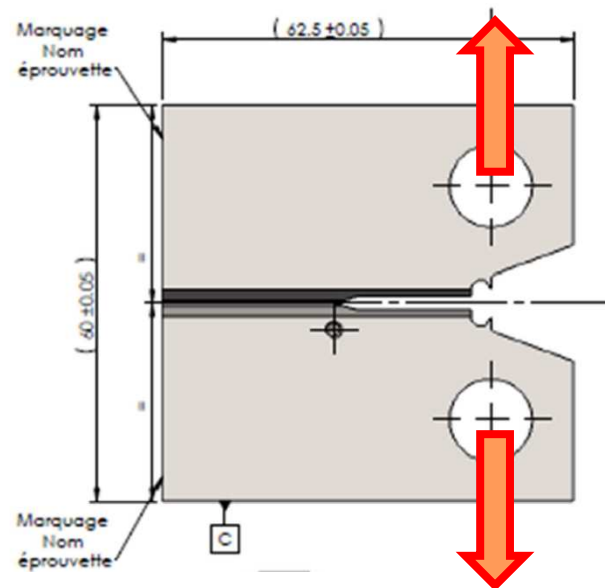
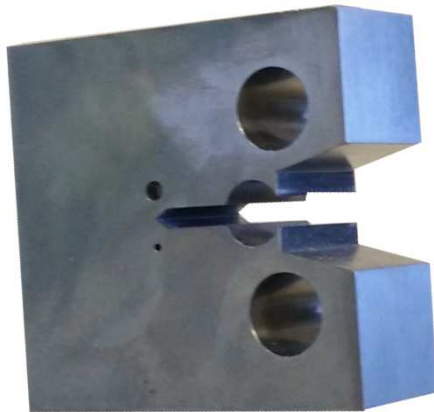
- ▶ **Les essais de ténacité doivent caractériser les deux domaines**
 - ◆ Scalaire $J_{0.2}$ pour la déchirure ductile
 - ◆ Courbe enveloppe K_{Jc} (Température) pour le rupture par clivage
- ▶ **Ces essais sur réalisés sur des éprouvettes fissurées : les éprouvettes CT**



Pendant l'essai, on impose un déplacement qui 'écarter' les deux trous de chargement

1 – Principe de mesure de la ténacité

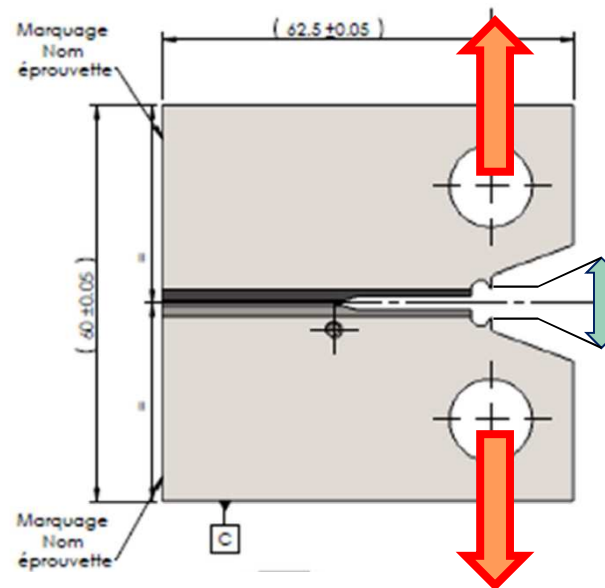
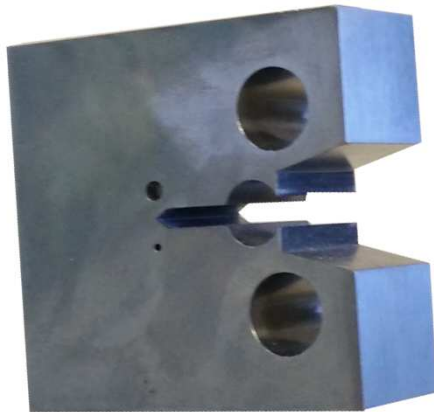
- ▶ **Les essais de ténacité doivent caractériser les deux domaines**
 - ◆ Scalaire $J_{0.2}$ pour la déchirure ductile
 - ◆ Courbe enveloppe K_{Jc} (Température) pour le rupture par clivage
- ▶ **Ces essais sur réalisés sur des éprouvettes fissurées : les éprouvettes CT**



Pendant l'essai, on mesure :
1/ la force imposée pour ouvrir l'éprouvette

1 – Principe de mesure de la ténacité

- ▶ **Les essais de ténacité doivent caractériser les deux domaines**
 - ◆ Scalaire $J_{0.2}$ pour la déchirure ductile
 - ◆ Courbe enveloppe K_{Jc} (Température) pour le rupture par clivage
- ▶ **Ces essais sur réalisés sur des éprouvettes fissurées : les éprouvettes CT**



Pendant l'essai, on mesure :

- 1/ la force imposée pour ouvrir l'éprouvette
- 2/ l'ouverture de la fissure

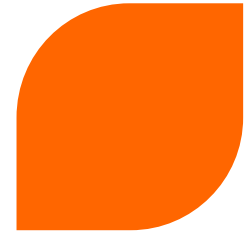
1 – Principe de mesure de la ténacité



► Pour la déchirure ductile (protocole normalisé – ASTM E1820)

- ◆ Le mode de ruine est peu dispersé : trois essais par température
- ◆ La fissure amorce (cad commence à croître) puis propage de manière stable (sans rupture de l'éprouvette)
 - On fait propager la fissure durant l'essai - l'essai est arrêté après 1-2 mm de déchirure
 - La difficulté principale de l'essai est l'estimation de la longueur de fissure au cours du temps pendant l'essai – requiert un savoir-faire important
- ◆ L'instant de démarrage de la propagation est très difficile à identifier avec précision : La ténacité à l'amorçage correspond à la sollicitation de la fissure (représentée par le paramètre J) pour une propagation de 0.2 mm : $J_{0.2}$

1 – Principe de mesure de la ténacité



► Caractérisation du domaine fragile

- ◆ Le mode de ruine est par essence dispersé :
 - il faut multiplier les essais pour disposer d'un nombre suffisant de résultats pour en déduire l'enveloppe minimale
 - Chaque essai est mené jusqu'à la rupture de l'éprouvette

- ◆ Pour les analyses mécaniques : courbe enveloppe minimale $K_{Jc}(Température)$
 - pour la famille des aciers faiblement alliés, la forme de la courbe enveloppe $K_{Jc}(T)$ est définie et ne dépend que de la température : elle est centrée sur une température de référence propre au matériau notée RT_{NDT}
 - Il n'y a pas de méthode permettant directement de déduire RT_{NDT} des essais de ténacité
 - On s'appuie sur une démarche alternative pour caractériser la statistique des résultats et en déduire la RT_{NDT} enveloppe des essais de ténacité : approche Master Curves
 - Master Curve : approche écrivant la distribution de probabilité à rupture des aciers de cuve, introduisant une autre température de référence T_0 , identifiée sur les essais de ténacité directement (Norme ASTM E1920)

1 – Principe de mesure de la ténacité



► Caractérisation du domaine fragile

- ◆ Ainsi pour caractériser la rupture fragile, on recherche avant tout la température d'indexation des courbes de référence (Master curve ou courbe enveloppe codifiée)
 - Les essais sont faits dans une plage de températures permettant de caractériser au mieux cette rupture fragile (correspondant à des températures basses) et non aux températures minimales en fonctionnement
 - On cherche une caractérisation de la distribution des résultats d'essais

1 – Principe de mesure de la ténacité



► Caractérisation du domaine fragile

◆ La norme considérée ASTM E1921:

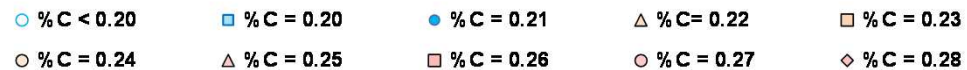
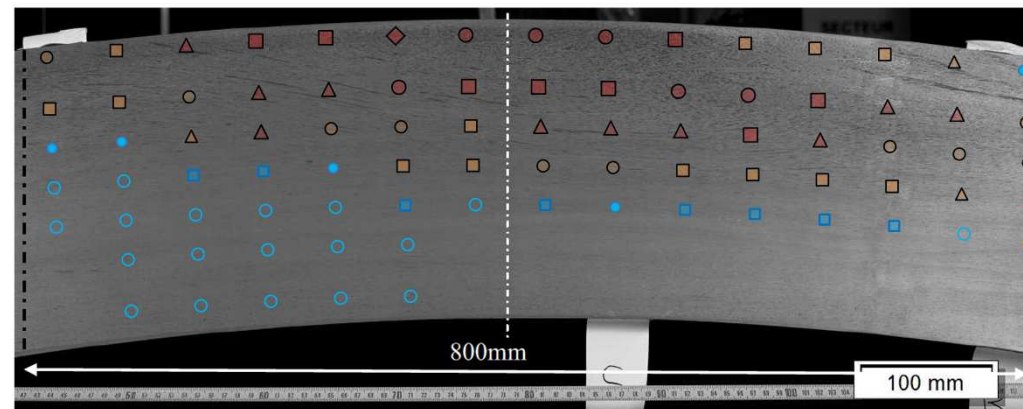
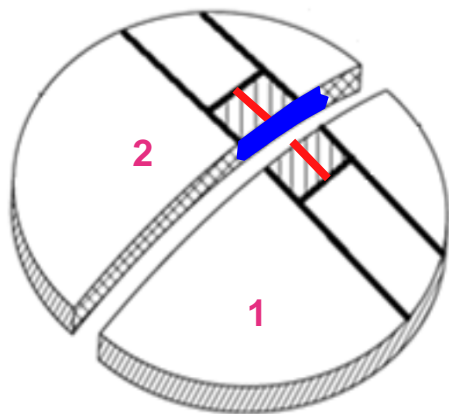
- Est une norme dédiée à la caractérisation de la transition fragile-ductile des aciers de cuve REP et donc une norme essentiellement nucléaire;
- Elle décrit l'ensemble de processus pour appliquer l'approche Master Curves
- Permet de définir les températures d'essai pertinentes pour caractériser la distribution à rupture du matériau dans le domaine de la transition;
- Fournit un protocole expérimental précis.

2 – Programme sacrificiel



► Le programme vise à caractériser la ténacité de la zone macroségrégée de trois calottes sacrificielles

- ◆ Calotte UK Supérieure, UA inférieure et UA Supérieure
- ◆ Pour chaque calotte, la zone d'intérêt est caractérisée spatialement à partir de la mesure du taux de carbone



2 – Programme sacrificiel



- ▶ **Le programme vise à caractériser la ténacité de la zone macroségrégée de trois calottes sacrificielles**
 - ◆ Calotte UK Supérieure, UA inférieure et UA Supérieure
 - ◆ Pour chaque calotte, la zone d'intérêt est caractérisée spatialement à partir de la mesure du taux de carbone
 - Zones où %C > 0.22 (spécification RCC-M)
 - Accent sur les zones où %C > 0.25 (spécification ASME)

 - UK Sup : $\frac{1}{4}$ épaisseur et $\frac{1}{2}$ épaisseur
 - UA Inf et UA Sup : $\frac{1}{4}$ épaisseur, $\frac{1}{2}$ épaisseur, $\frac{3}{4}$ épaisseur
 - ◆ Pour chaque zone d'intérêt, un programme complet est mené
 - ◆ En complément, afin de constituer une référence et quantifier l'impact de la macroségrégation, un programme comparable est mené dans la matière de recette des calottes sacrifiées et des deux calottes FA3

2 – Programme sacrificiel



► Pour chaque zone d'intérêt, sont réalisés :

- ◆ Une courbe de résilience et des essais Charpy complémentaires à 0°C pour comparaison aux requis de l'arrêté ESPN
- ◆ Une caractérisation de la RT_{NDT} de la zone ségréguée selon la procédure utilisée en recette sur la base d'essai de choc (PELLINI + Résilience)
- ◆ Des essais de ténacité pour caractériser le domaine de la transition fragile-ductile (norme ASTM E1921)
 - Autant d'essais que possible selon la matière disponible avec une cible entre 50 et 70 essais
 - Essais sur éprouvette de dimension réduite / standard : compromis entre domaine de température couvert et disponibilité de la matière – cette dimension est cependant gérée par la norme et n'a pas d'impact pour les points bas
 - A titre de comparaison, la norme ASTM E1921 exige au minimum 8 essais et la pratique s'appuie en général sur 12-15 essais
- ◆ Des essais de ténacité dans le domaine ductile (norme ASTM E1820)
 - Essais à 50°C (Epreuve Hydraulique) et 330°C (fonctionnement)
 - 3 essais par température sur éprouvette standard CT25

2 – Programme sacrificiel



► Volume du programme

	FA3 INF	FA3 SUP	UK SUP			UA INF				UA SUP			
Tests	Recette	Recette	Recette	ZS ¼ ep.	ZS ½ ep.	Recette	ZS ¼ ep.	ZS ½ ep.	ZS ¾ ep.	Recette	ZS ¼ ep.	ZS ½ ep.	ZS ¾ ep.
Charpy	18	18	18	36	36	18	36	36	36	18	36	36	36
J0.2	6 CT 25	6 CT 25	6 CT 25	6 CT 25	6 CT 25	6 CT 25	6 CT 25	6 CT 25	6 CT 25	6 CT 25	6 CT 25	6 CT 25	6 CT 25
Transition	48 CT 12.5	48 CT 12.5	48 CT 12.5	48 to 72 CT 12.5	48 to 72 CT 12.5	48 CT 12.5	48 to 72 CT 12.5	48 to 72 CT 12.5	48 to 72 CT 12.5	48 CT 12.5	48 to 72 CT 12.5	48 to 72 CT 12.5	48 to 72 CT 12.5
Tensile	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
PELLINI	-	-	-	16	16	-	8	8	8	-	8	8	8
AREVA St Marcel		AREVA Erlangen		SCK		3eme lab							

2 – Programme sacrificiel



▶ Quelques éléments de planning

- ◆ Essais zone ségrégée UK Sup : mi-avril 2016 (AREVA Erlangen)
 - 35 essais réalisés à date (résultats à consolider) – résultats permettant de vérifier la demande 9 de la lettre de suite de l'ASN (Recommandations 3 du GP ESPEN du 30/09/2015) basée sur le respect des hypothèses de conception

- ◆ Essais zone ségrégée UA Inf : début juin 2016 (SCK)

- ◆ Essais zone ségrégée UA Sup : 2nd semestre 2016

3 – Choix des laboratoires



▶ **Compte tenu de l'ampleur du programme initial, il a été nécessaire de faire appel à deux laboratoires**

- ◆ L'ajout récent d'une troisième calotte sacrificielle impose d'impliquer un troisième laboratoire

▶ **Plusieurs critères de choix ont été retenus pour les laboratoires d'essais (par ordre d'importance) :**

◆ **Savoir – faire technique**

- Le nombre de laboratoires d'essais techniquement capables de réaliser le programme complet est faible.
- En particulier :
 - La caractérisation de la ténacité dans le domaine ductile à 330°C (température de fonctionnement) implique des équipements spécifiques et délicats à mettre en œuvre
 - Pour la rupture fragile, la norme ASTM E1921 est dédiée aux aciers de cuve REP et est donc une spécificité nucléaire : seuls des laboratoires travaillant pour ce secteur ont l'expérience nécessaire

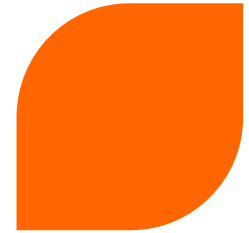
◆ **Accréditation ISO 17025**

- Cette certification offre une garantie sur le savoir faire et la maîtrise des normes spécifiées

◆ **Capacité du laboratoire à gérer la totalité du programme, à savoir de l'usinage à la réalisation des essais**

◆ **Délai de réalisation**

3 – Choix des laboratoires



▶ CT AREVA Erlangen

- ◆ Maitrise l'ensemble des essais et les pratique régulièrement
- ◆ Très impliqué dans la R&D européenne en mécanique de la rupture, notamment sur les aspects rupture fragile
- ◆ Dispose des accréditations ISO 17025 pour l'ensemble des normes utilisées dans le programme

▶ SCK

- ◆ Maitrise les essais de ténacité et les pratique régulièrement
- ◆ Laboratoire en charge des essais du dossier DOLE3-TIHANGE2 (défauts hydrogène dans les virole de cœur)
- ◆ Très impliqué dans la R&D européenne sur les aspects rupture fragile
- ◆ Participe au comité de normalisation de l'ASTM E1921
- ◆ Dispose des accréditations ISO 17025 nécessaires