

CORROSION SOUS CONTRAINTE PHÉNOMÉNOLOGIE ET REX INTERNATIONAL

Réunion ANCCLI du 10 novembre 2022

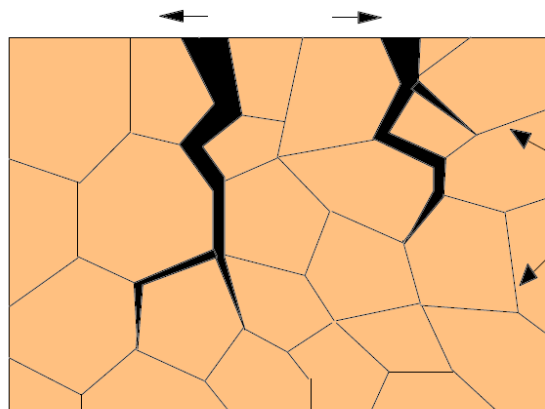
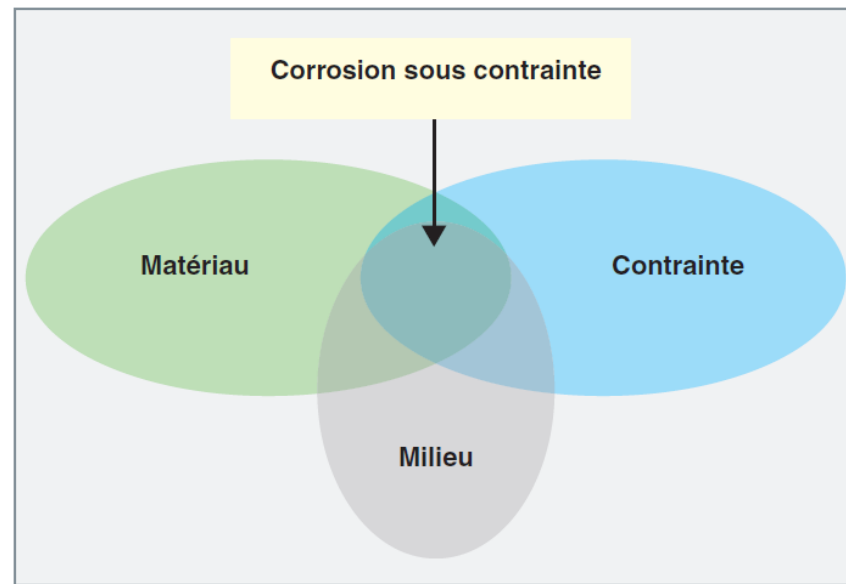
Introduction

[CONTEXTE ET ENJEU

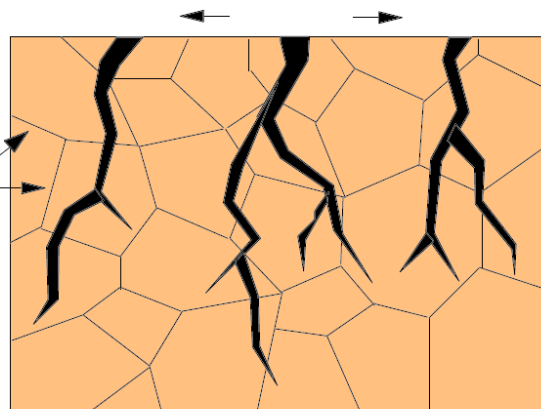
- Généralités sur la CSC
- CSC des aciers inoxydables en milieu primaire REP en laboratoire
- CSC des aciers inoxydables en milieu primaire REP – REX international
- Conclusions

Éléments généraux

[ÉLÉMENTS DE DÉFINITION



Joints
de grains

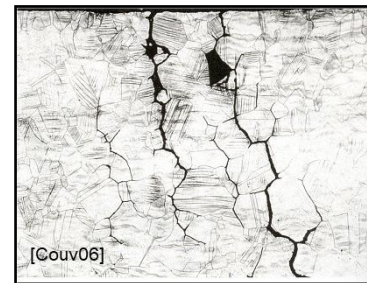
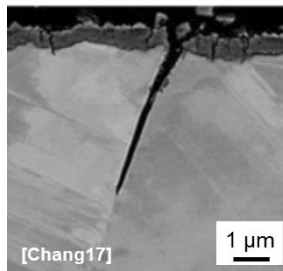
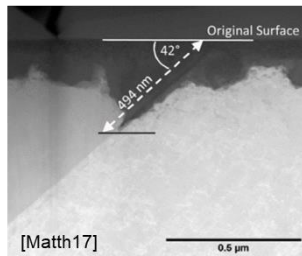
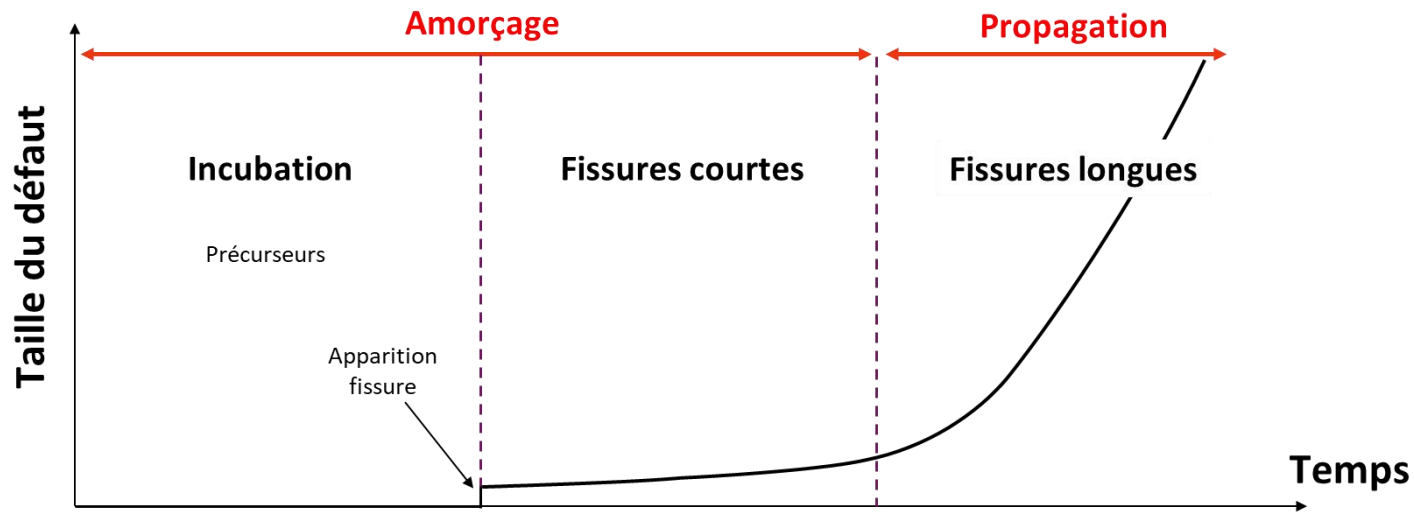


2 modes de fissuration

- Intergranulaire
- Transgranulaire

Éléments généraux

[PHÉNOMÉNOLOGIE



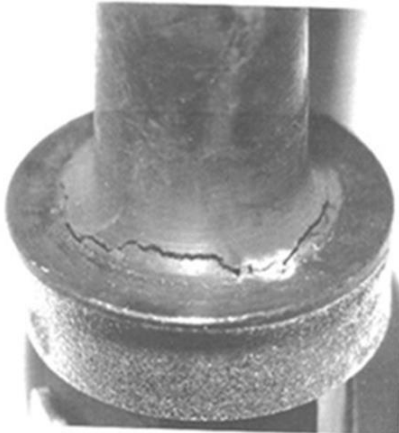
[PHÉNOMÉNOLOGIE

- Pas de déformation macroscopique apparente
- Pas d'oxydation visible de la surface (pas de « rouille »)
- Peut conduire à des fuites ou des ruptures de pièces sans signe précurseur
- Caractère aléatoire – difficulté de prédiction et non transposabilité
 - L'absence de CSC sur un composant à un moment donné ne permet pas de statuer sur un composant similaire

Éléments généraux

[PHÉNOMÉNOLOGIE

- Pas de déformation macroscopique apparente
- Pas d'oxydation visible de la surface (pas de « rouille »)
- Peut conduire à des fuites ou des ruptures de pièces sans signe précurseur
- Caractère aléatoire – difficulté de prédiction et non transposabilité



3 (x 3,5)



Éléments généraux

[FACTEURS INFLUENTS

■ Contraintes

- Plus elles sont élevées, plus le phénomène est rapide
 - Fissures plus rapides et plus rapides d'apparition

■ Ecrouissage – déformation initiale liée aux opérations de fabrication

- Plus il est important, plus un matériau peut être sensible

■ Microstructure

- Une microstructure non conforme peut rendre le matériau plus sensible à la corrosion, donc à la CSC

■ Chimie

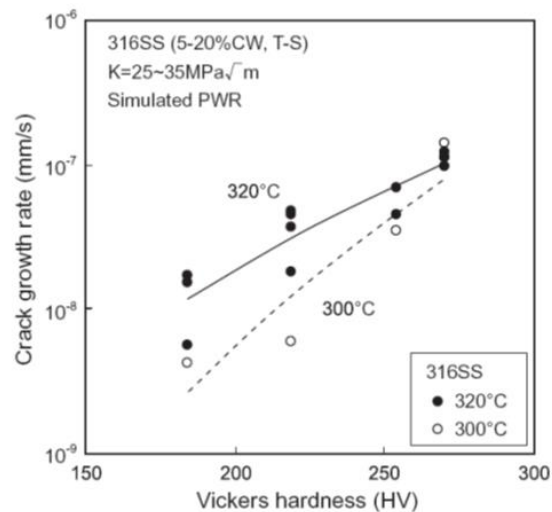
- Des impuretés accroissent la corrosivité du milieu, donc favorisent l'apparition des fissures et augmentent leur vitesse de propagation

■ Température

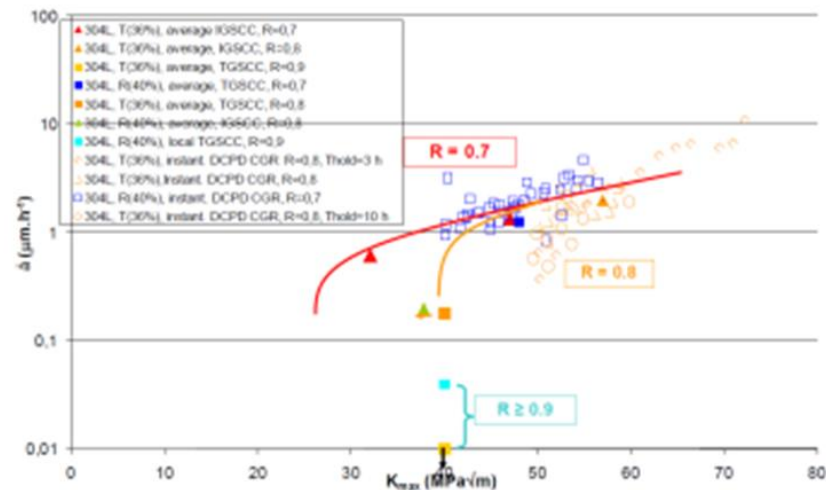
- Plus elle est élevée, plus les réactions chimiques sont activées, ce qui favorise la CSC.

CSC des aciers inoxydables en milieu primaire en laboratoire

[QUELQUES DONNÉES DE LABORATOIRE (1/2)



Terachi et al., JNM 2012



Couvant, ED16, 2013

- Vitesses de propagation comprises entre 10^{-9} mm/s to 10^{-6} mm/s en milieu primaire nominal
- Valeurs de 10^{-7} mm/s possible pour aciers écrouis 20% à 300°C (~ 3 mm/an) dans ces conditions
- Importance du type de sollicitation mécanique

Interlude

[ÉLÉMENTS DE CHIMIE PRIMAIRE

- Chimie très contrôlée
- Niveaux d'impuretés très faibles

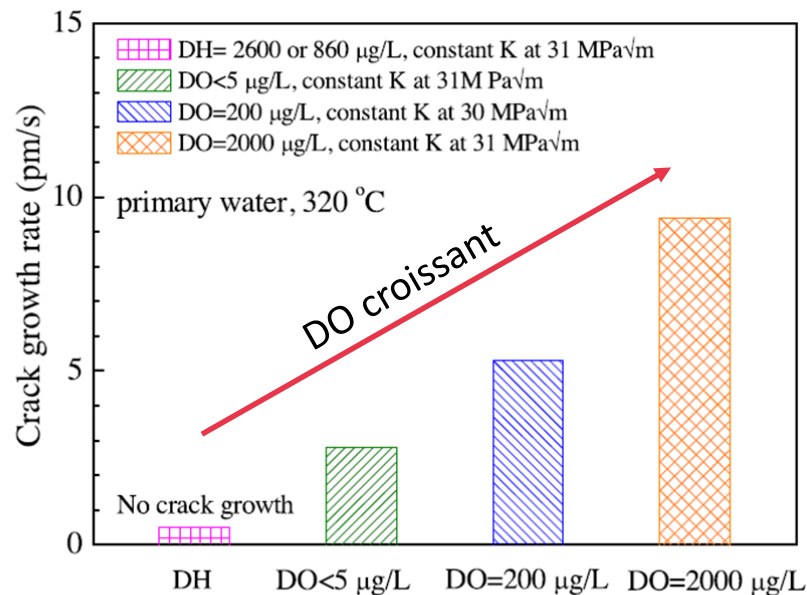
Primary Water Chemistry

Role	Species	Concentration
Burnable poison	H_3BO_3	1500 ppm to zero
pH adjust	LiOH	Adjust to meet 7.1-7.4 pH_T
Minimize radiolytic oxygen	H_2	25-50 STP cc/kg
Oxygen	O_2	< 5 ppb
Corrosion product	Fe	No spec.
	Ni, Co	
Contaminant	Cl, SO_4 , F	Each < 0.15 ppb

155 bar - <350°C

CSC des aciers inoxydables en milieu primaire en laboratoire

[QUELQUES DONNÉES DE LABORATOIRE (2/2)



Han et al.
Corrosion Science, 2016

- Fort effet accélérateur de la présence d'oxygène dans le milieu (X7 possible)
 - Fuites, injections d'eaux désaérées

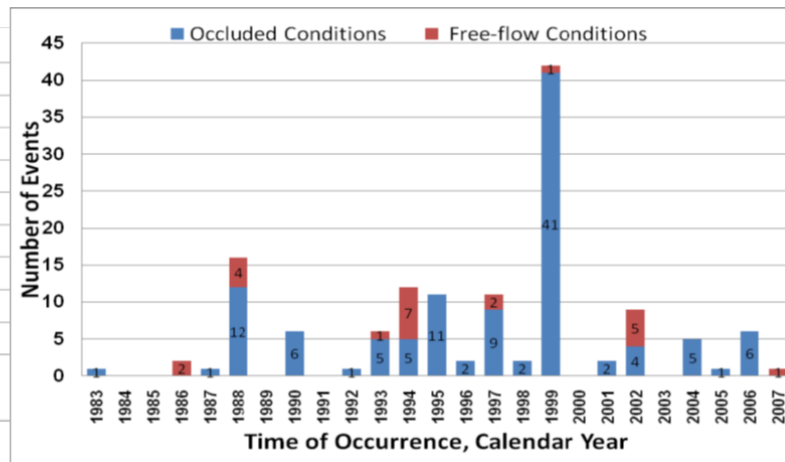
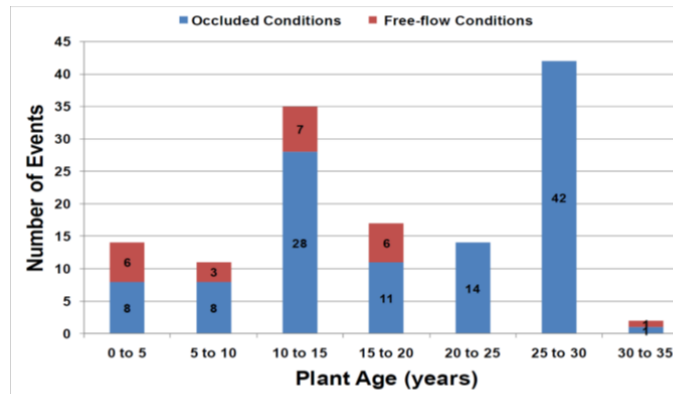
[CONTEXTE ET ENJEU

- Les aciers inoxydables austénitiques constituent le matériau d'une grande majorité de pièces du CPP et des auxiliaires
 - ❑ Tuyauteries, visserie, les structures internes de la cuve
- REX très bon dans les REP, contrairement aux REB
 - ❑ Néanmoins quelques cas de corrosion recensés, mais nombre faible au regard du nombre de composants, réacteurs et années de fonctionnement.
 - ❑ Pour autant, risque de perte d'intégrité, réparations conséquentes et dosantes
- Peu de recensements étayés
 - ❑ NEA (2011) – 435 cas entre 1970 et 2010, mais pas de détails
 - ❑ EPRI (2010) – 137 cas entre 1983 et 2007, recensement détaillé auprès des exploitants

Analyse du REX par EPRI (1/3)

[ENQUÊTE EPRI AUPRÈS DES EXPLOITANTS

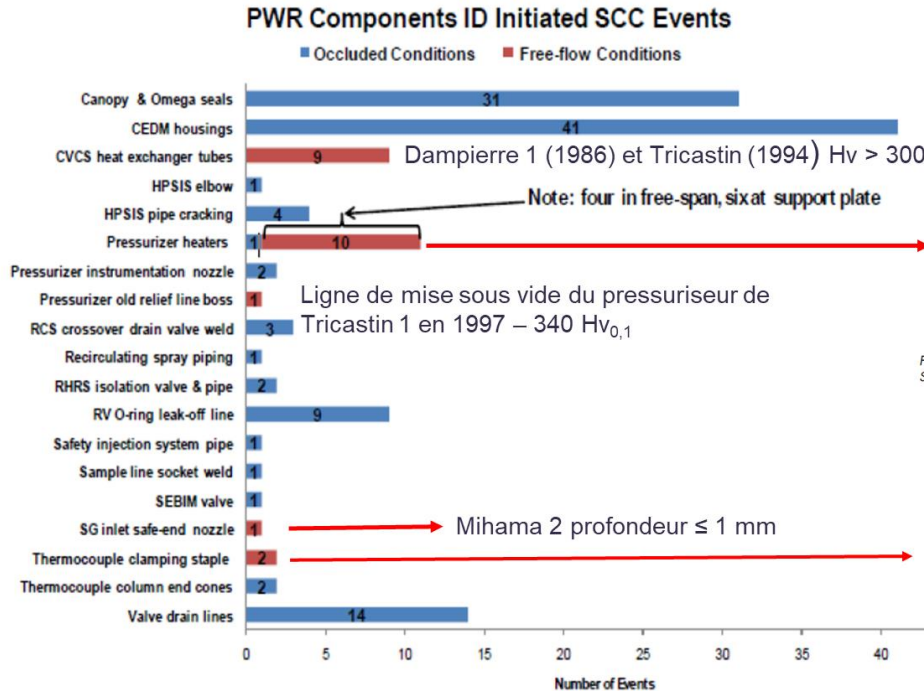
137 cas entre 1983 et 2007 (France incluse)



- ☐ Pas de corrélation calendaire ou avec l'âge des réacteurs
- ☐ 83 % des cas en milieu « occlus » / non-nominal

Analyse du REX par EPRI (2/3)

[ENQUÊTE EPRI AUPRÈS DES EXPLOITANTS



AISI 316L – SCC of pressurizer heaters (1997)

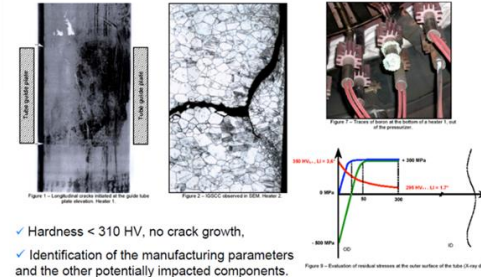
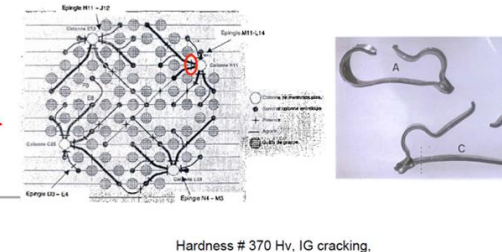


Figure 2-6
Stress corrosion cracks in Sizewell B pressurizer heater sheath [16]

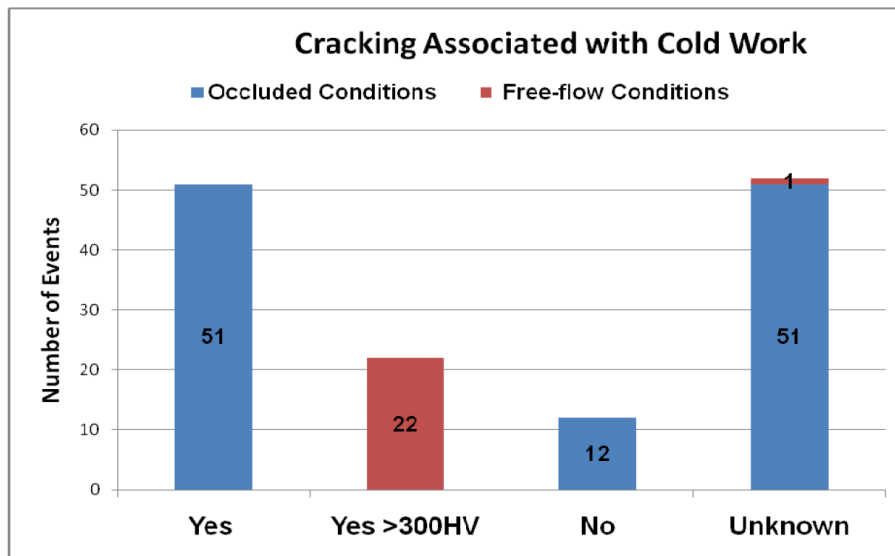
AISI 304L – SCC of thermocouple supports



- Différents types de composants sont affectés par la CSC majoritairement en milieu occlus

Analyse du REX par EPRI (3/3)

[LIEN AVEC LES FABRICATIONS (MISE EN FORME, SOUDAGE, FINITIONS DE SURFACE)



Dureté : mesure du niveau d'écrouissage/déformation de l'acier.

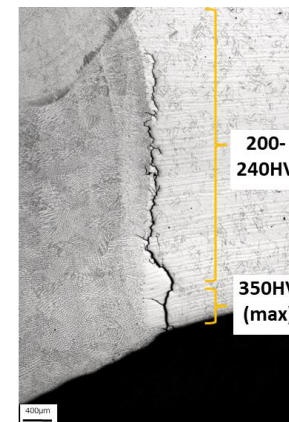
Plus il est déformé, plus il est dur

Non déformé : 180 HV

☐ En milieu non occlus, toujours un écrouissage conséquent

[DEUX CAS D'INTÉRÊT

- Coude RIS/RRA de Daya Bay (2011)
 - ❑ Fuite en service après 20 ans de fonctionnement
 - ❑ Fissure dans le coude
 - ❑ Acier 316L écroui, très dur
 - ❑ Absence d'hypertrempe après cintrage à froid des coudes
 - ❑ (étape d'adoucissement du matériau)
- Ligne d'aspiration du pressuriseur de Ohi-3 (2020)
 - ❑ Fissure d'environ 4,4 mm, circonférentielle, intergranulaire
 - ❑ Fort écrouissage de surface et propagation en zone affectée par le soudage
- Nouveau bilan : entre 1983 et 2022 environ 150 cas rapportés



Enseignements du REX international

- CSC des aciers inoxydables en milieu primaire REP
 - ❑ Phénomène relativement rare
 - ❑ Essentiellement dans les zones confinées ou stagnantes
 - ❑ Peu de fissures par cas (exemple : 1 seule fissure pour le cas d'Ohl 3)
 - ❑ Sinon, nécessité d'un écrouissage conséquent en milieu nominal ($HV > 300$ et $HV_{0,1}$ en surface > 340)

- Un seul de cas de fissuration de coude RIS cité dans le bilan de l'EPRI
 - ❑ 1 coude fissuré dans la zone affectée par le soudage d'une soudure, aux USA, en 1997 (IN 97-19)
 - ❑ Fissure de 18 cm de long, 75% de l'épaisseur (environ 19 mm)
 - ❑ Détectée par des contrôles ultrasons, en proximité d'une vanne, en Branche Froide
 - ❑ Soudure reprise 4 fois (sensibilisation, contraintes résiduelles élevées) et entrées d'air lors du redémarrage

- REX EDF depuis fin 2021 est atypique

Analyse des limites du REX international et de l'état de l'art

■ Limitations du REX

- ❑ Nombre de soudures inspectées relativement faible (sondage avec une proportion variant selon les exploitants – 10-25% des soudures auxiliaires)
- ❑ Recherche principalement des défauts de fatigue thermique dans les REP
- ❑ Des méthodes de contrôle variables (ultrasons dans les pays ayant eu des réacteurs à eau bouillante, suite au REX de fissuration des soudures)
- ❑ Défauts découverts par des fuites, parfois.

■ Limitations de la R&D

- ❑ Amorçage de fissures de CSC très difficile en laboratoire, sur des matériaux représentatifs (écrouissage, notamment)
- ❑ Difficulté de déduire des critères d'ingénierie précis

Conclusions

■ REX international

- ☐ Peu abondant, peu de cas rapportés
- ☐ Méthodes de contrôles variables en fonction des exploitants

■ REX EDF depuis fin 2021

- ☐ Très atypique en termes d'étendue
- ☐ Mais beaucoup de ressemblance avec les cas de CSC dans les réacteurs à eau bouillante
- ☐ CSC intergranulaire en zone affectée par le soudage
- ☐ Aciers non sensibilisés, duretés équivalentes
- ☐ Milieu aéré ?

■ Perspectives d'analyse du REX

- ☐ Nécessité d'affiner le REX international (types de contrôles, étendue et fréquence)
- ☐ Analyse de l'historique d'exploitation dans les bras morts (REX américain fait état d'entrées d'air pour le cas de fissuration dans cette zone)

[MERCI POUR VOTRE ATTENTION

[ANNEXE

Éléments généraux

[PHÉNOMÉNOLOGIE

