

Le phénomène de corrosion sous contrainte sur les circuits auxiliaires de réacteurs du parc nucléaire

1

Chronologie de la découverte du phénomène de CSC sur les circuits auxiliaires du CPP



2

Etat des lieux des installations et enseignements



3

Enjeux de sûreté



4

Perspectives



Les expertises et contrôles

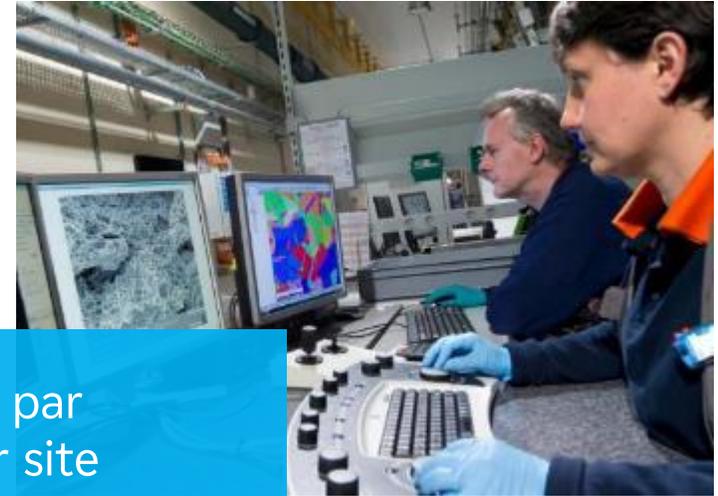
Un programme de contrôles et expertises dense a été défini pour l'ensemble du parc nucléaire.

L'analyse basée sur des expertises de circuits et la réalisation de calculs, simulations numériques et de tests menés dans le laboratoire d'expertises métallurgiques d'EDF (LIDEC) ont mis en évidence plusieurs éléments :

- la localisation du phénomène dans la zone affectée thermiquement par les soudures,
- l'influence a priori prépondérante de la géométrie des circuits,
- l'influence des procédés de soudage,
- l'existence d'une zone de compression dans le métal, qui limite l'évolution du phénomène de CSC à quelques millimètres.

Dès mai 2022, EDF a indiqué qu'il n'était nécessaire d'arrêter de réacteurs supplémentaires.

Les premiers travaux de préparation des réparations ont été initiés dès le mois de mai.

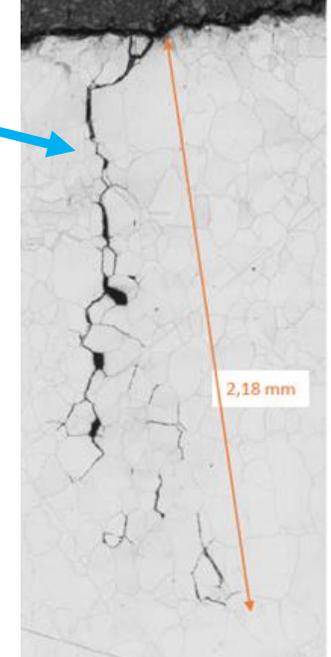
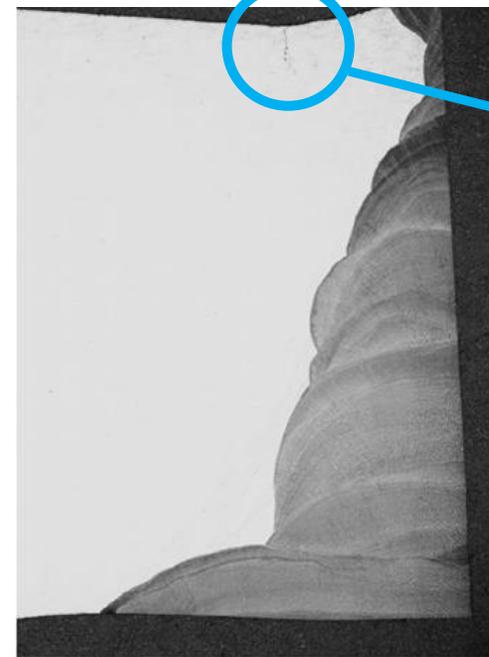
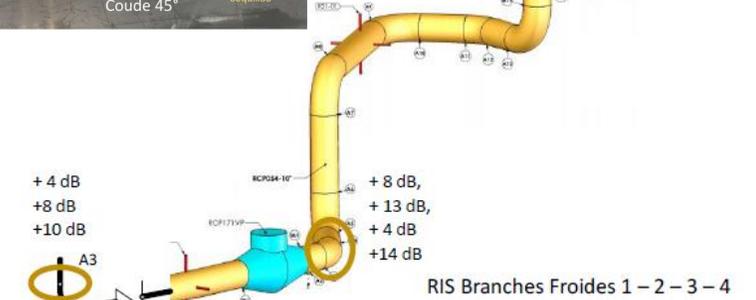
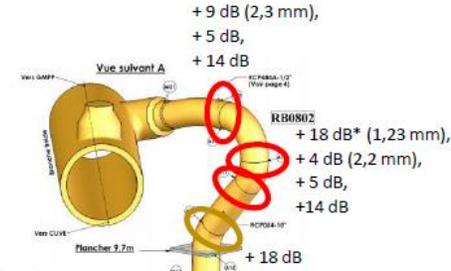
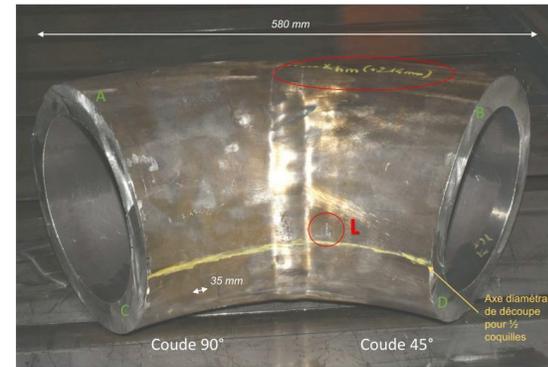
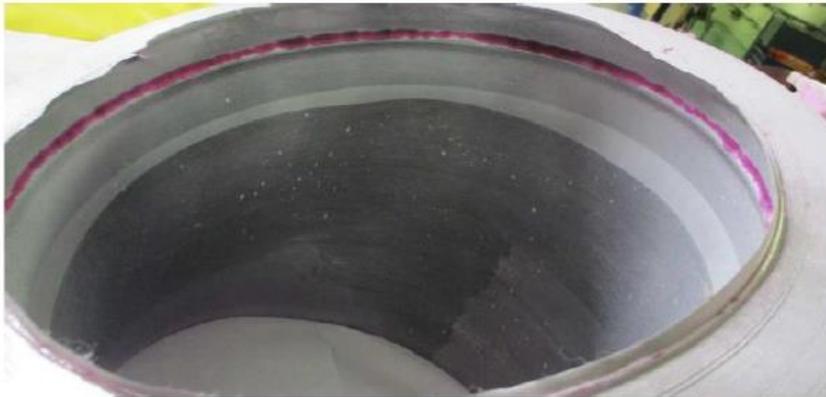
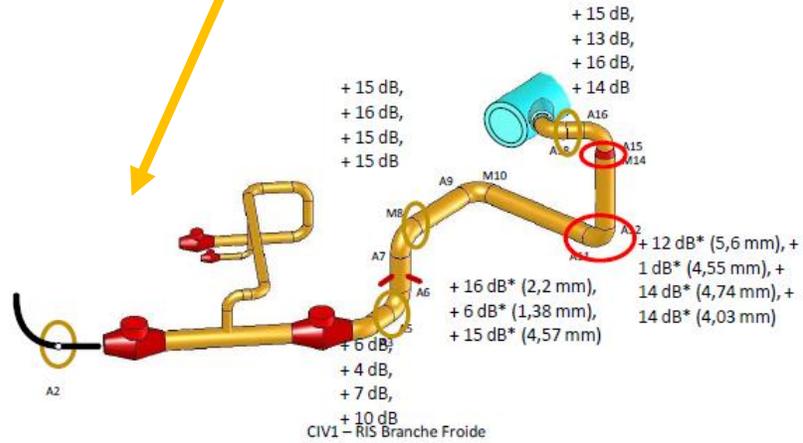


84 examens par
ressuage sur site
et 69 expertises
métallographiques en
laboratoire (LIDEC)



Les premières expertises

- soudures de CIV1
- soudures de PEN1
- 3 soudures historiques sur le palier 900



Une compréhension des phénomènes basée sur un programme historique d'expertises

Expertises

- + 115 soudures ressuées en laboratoire
- + de 230 échantillons métallographiques
- + de 160 zones analysées en micro-dureté (cartographie sous Hv sous 100 g et 500 g)
- + de 70 cartographies EBSD

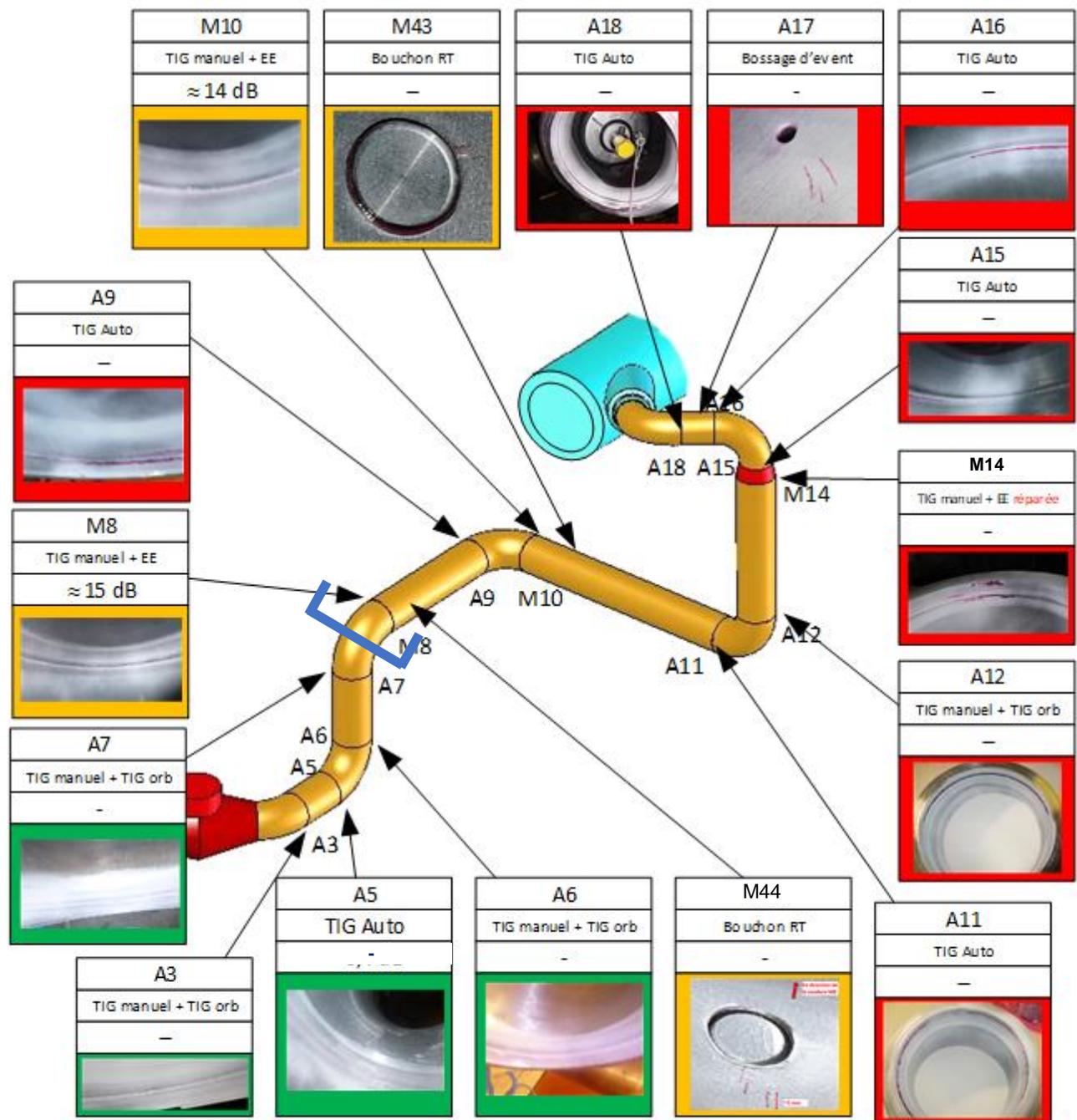
Lignes concernées par des expertises – état au 07/10/22

	RIS BF		RRA BC		RRA BF	
	Ressuage site / RVE*	Expertise LIDEC	Ressuage site	Expertise LIDEC	Ressuage site	Expertise LIDEC
CIV1	17	34	2	6	-	-
CIV2	31	3	8	-	-	-
CHZB1	21	8	8	-	-	-
CHZB2	7	-	-	-	-	-
PEN1	11 / 4*	33	3	-	1	1
CAT4	7	5	-	-	-	-
CAT3	2 / 6*	8	-	-	-	-
FLA2	8	6	-	-	-	-
CHB3	-	2	1	3	-	-
TRI3	-	-	1	1	-	-
BUG4	2	4	-	-	-	-
FES	1	2	-	-	-	-
TOTAL	107 / 10*	105	23	10	1	1

*EBSD : Electron Back Scattered Diffraction

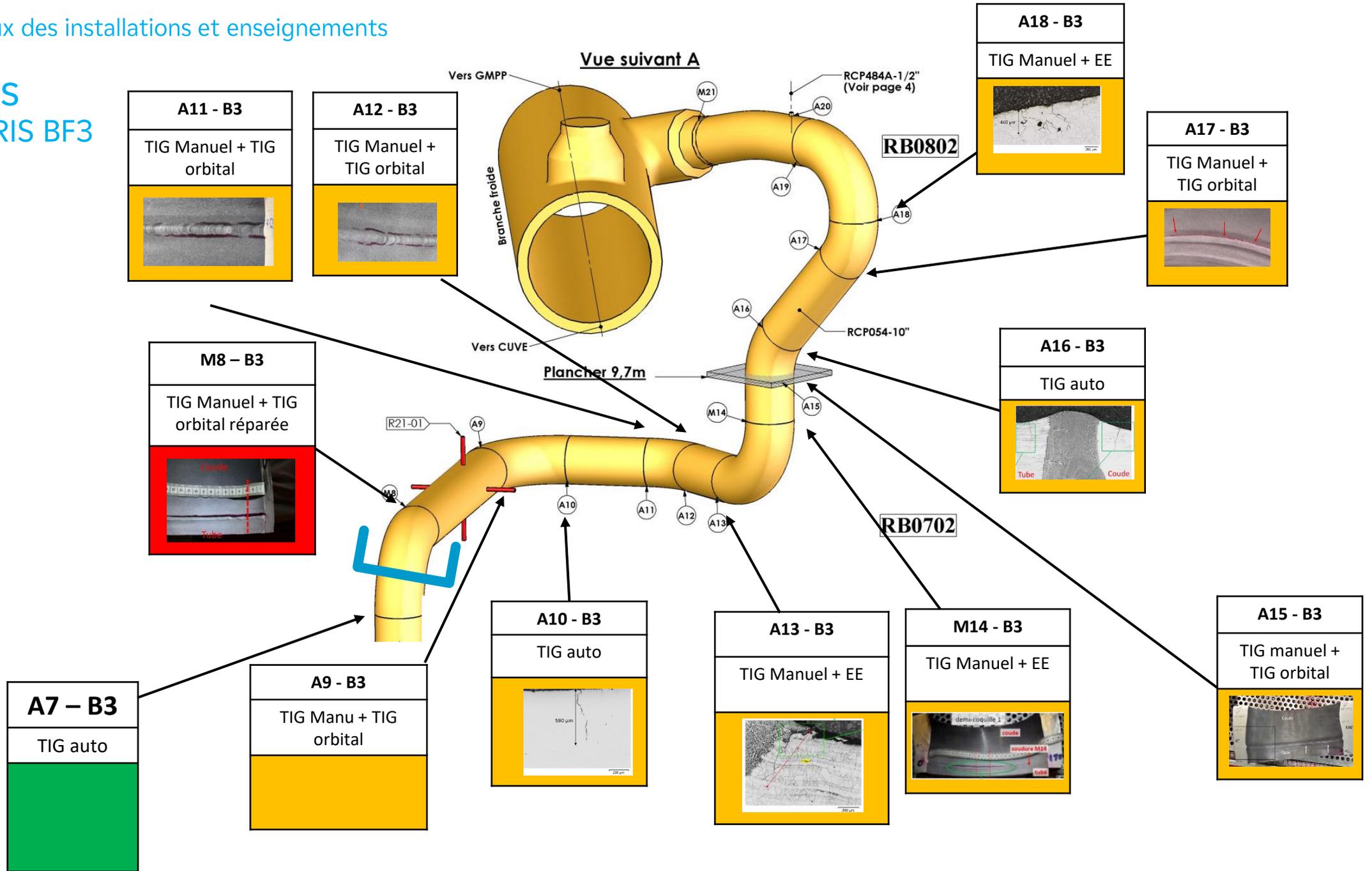
Expertises

N4 - Civ1 - RIS BF 4



Expertises

P'4 - PEN1 - RIS BF3



Les principales conclusions des analyses en laboratoire

Les défauts sont systématiquement de la CSC intergranulaire

- Il n'y a aucun mélange Fatigue Thermique et CSC: lorsqu'un mode d'endommagement se manifeste, il se produit exclusivement seul
- Aucune CSC transgranulaire

Carto microdureté, EBSD* et diagrammes de KAM*

- Les défauts se développent dans le métal de base uniquement
- Les défauts se développent en zone écrouie
- Les abords de soudures sont écrouis vis-à-vis des zones courantes de tuyauteries
- La paroi interne en bord de soudure est potentiellement fortement écrouie, participant à l'amorçage des défauts

Analyses détaillées des faciès

- Couche d'oxyde épaisse sur toute la hauteur des défauts
- Absence de polluant à différentes profondeurs

Illustration particulière de zones réparées

- Le défaut peut s'amorcer plus loin de la racine de la soudure (selon la position de la réparation), mais reste « confiné » en profondeur, pour les expertises réalisées à date

*EBSD : Electron Back Scattered Diffraction ; KAM : Kernel Average Misorientation

Les principales conclusions des analyses en laboratoire

EDF a poursuivi un programme intense de déposes des équipements pour expertiser les soudures, afin de borner les zones affectées par la corrosion sous contrainte et caractériser les soudures porteuses de FSI :

- Opérations réalisées sur 8 réacteurs (CIV1, PEN1, CAT4, FLA2, CHB3, TRI3, FES2, BUG4)
- Opérations en cours sur 4 réacteurs (CHZB1, CIV2, CHZB2, CAT3)
- Au 7/10/2022, 112 expertises réalisées en laboratoire

Une présence de défauts variable selon la conception des réacteurs

Absence de défaut de CSC	Présence de défauts de CSC
RIS FES2, BUG4, CHB3, TRI3 (palier 900 MW) : résultats 2022 qui confirment l'absence de défaut précédemment constatés sur SLB2, BLA2 et BLA3 RIS FLA2 (palier 1300 MW P4)	RIS PEN1, CAT3 (palier 1300 MW P'4) RIS CIV1 et CHZB1 (palier N4) RRA CHB3 (palier 900 MW), défaut initié sur un défaut de soudage RRA CIV1 (palier N4)

L'influence du soudage

La littérature identifie la section de métal déposé et le nombre de passes réalisées comme facteur d'ordre 1 dans le risque de déformation en racine des soudures. Ces deux paramètres peuvent donc influencer sur l'écroûissage en racine et donc sur la sensibilité à la CSC.

- **Section du métal déposé:**

La déformation est plus importante quand la section augmente

→ Extraction des schémas des chanfreins de chaque soudure issus des RFF et des DMOS

- **Nombre de passes :**

La déformation est plus importante quand le nombre de passes augmente

Il est établi que le nombre de passes mis en œuvre pour la réalisation des soudures ne sera pas accessible. (Technique de dépôt et séquençement des diamètres effectivement utilisés non extractible).

→ Le facteur nombre de passes est considéré au travers de la notion de taux de dépôt propre aux procédés utilisés pour le remplissage :

- Remplissage en TIG manuel, auto, orbital ou mécanisé

→ Procédé de remplissage considéré à faible taux de dépôt nécessitant un nombre de passes important

- Remplissage à l'Electrode enrobée

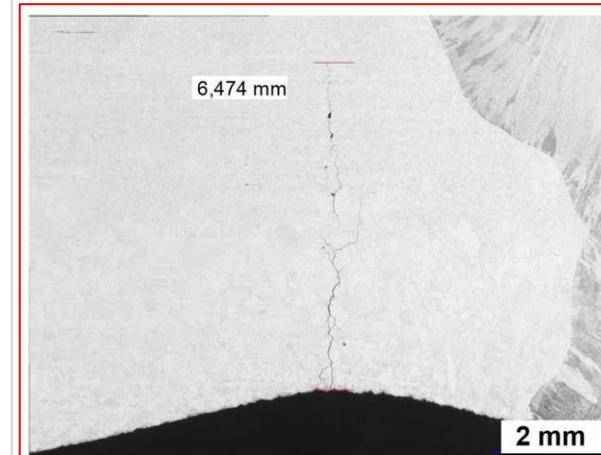
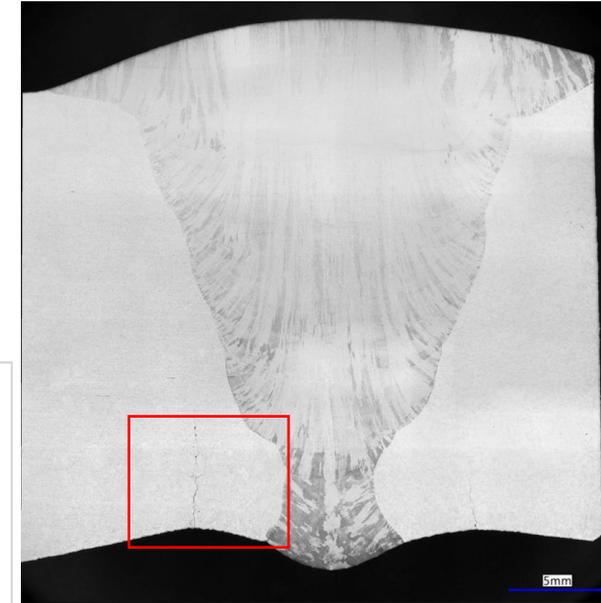
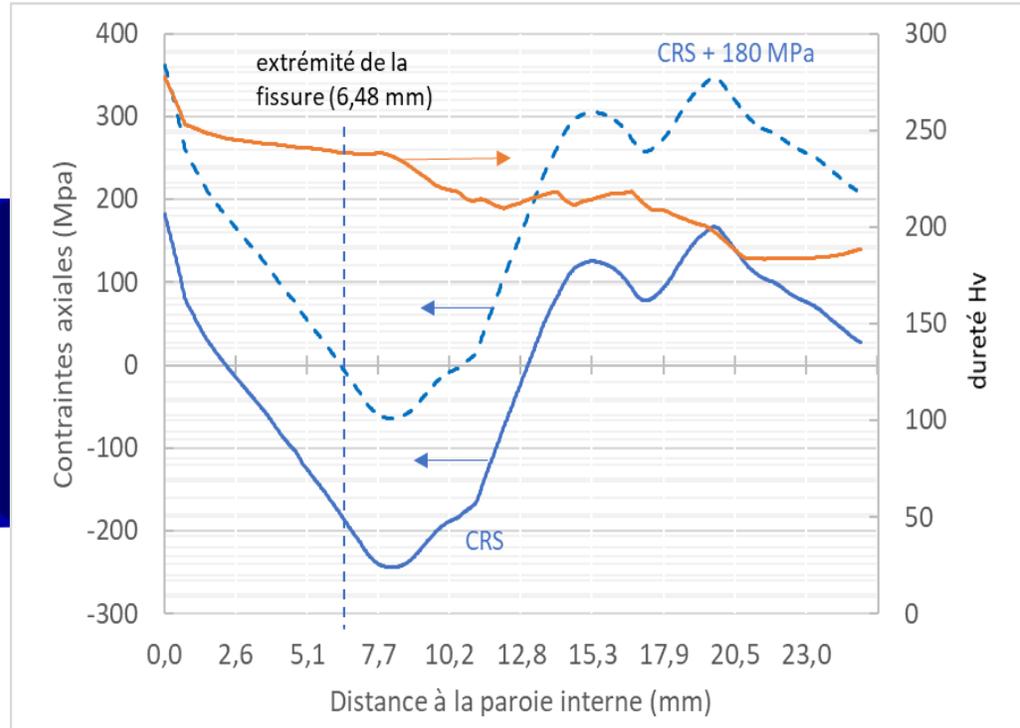
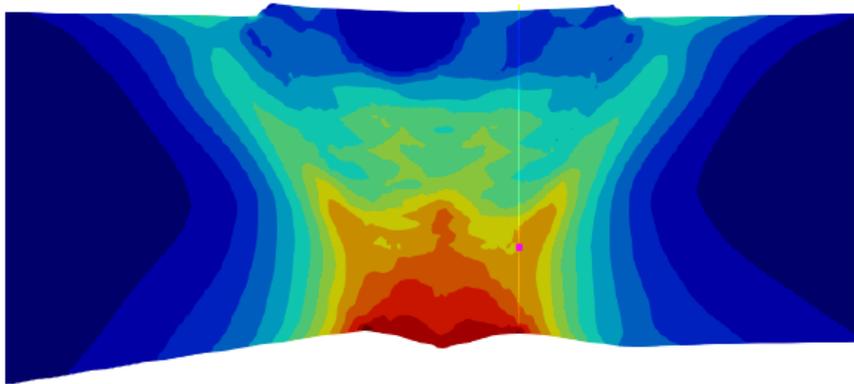
→ Procédés de remplissage considéré à taux de dépôt moyen nécessitant un nombre de passes intermédiaire

- Remplissage en fil sous-flux ou en EE + Fil sous-flux

→ Procédés de remplissage considérés à fort taux de dépôt nécessitant un nombre de passes limitée

L'influence du soudage

- EDF a réalisé de nombreuses simulations numériques de soudage. Ces simulations montrent la présence d'une zone de compression dans l'épaisseur la tuyauterie qui ralentit, voire stoppe, la propagation du défaut.
- La présence de cette zone de compression est confirmée par des mesures de contraintes résiduelles faites sur des maquettes de soudage.



Le phénomène vortex et de stratification thermique

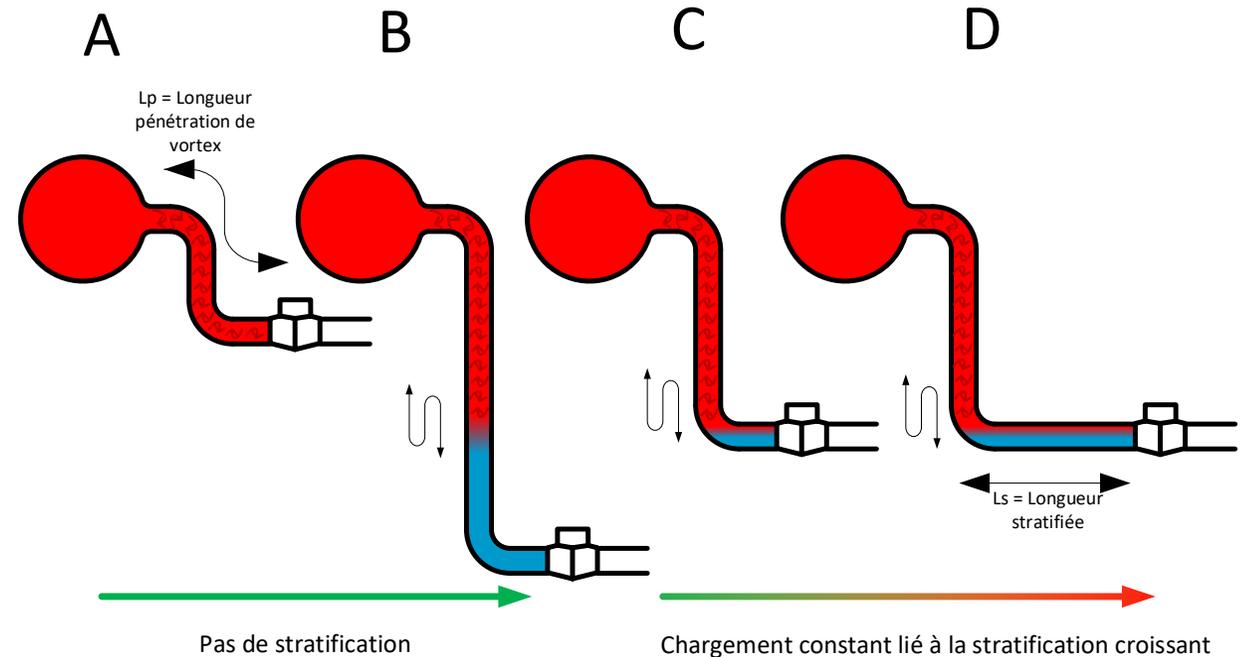
La « pénétration turbulente de vortex » correspond à une mise en mouvement d'eau depuis la branche principale (sous l'effet de la vitesse du fluide primaire).

Il s'étend sur une portion variable des lignes en fonction :

- du diamètre de la ligne,
- de l'isométrie de la ligne : coudes, té, divergents/convergents, etc...
- et présente un comportement chaotique qui peut induire des variations de pénétration à l'échelle d'un cycle, ou périodiquement en cours d'un cycle.

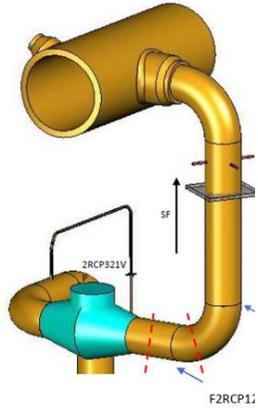
Globalement, ce type de pénétration couvre une zone de « 10 à 20 diamètres ».

Considérant les lignes présentant une extension basse, où une stratification peut se produire, 4 cas de figures sont possibles (configurations A à D).

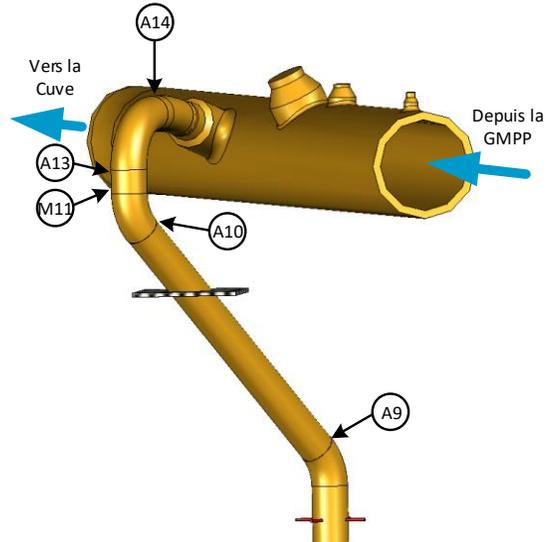


Design des lignes - exemple des lignes RIS branches froides

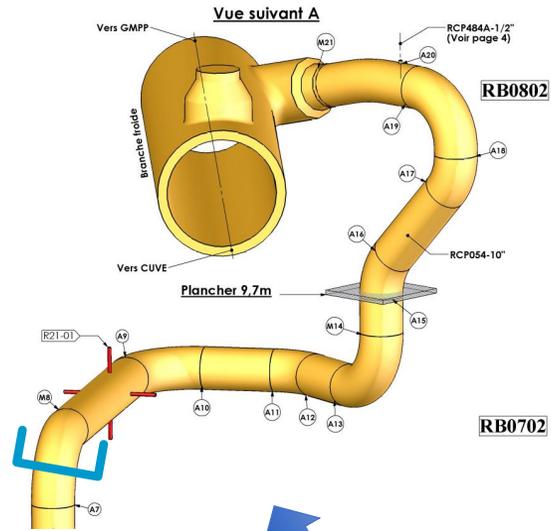
900 MW



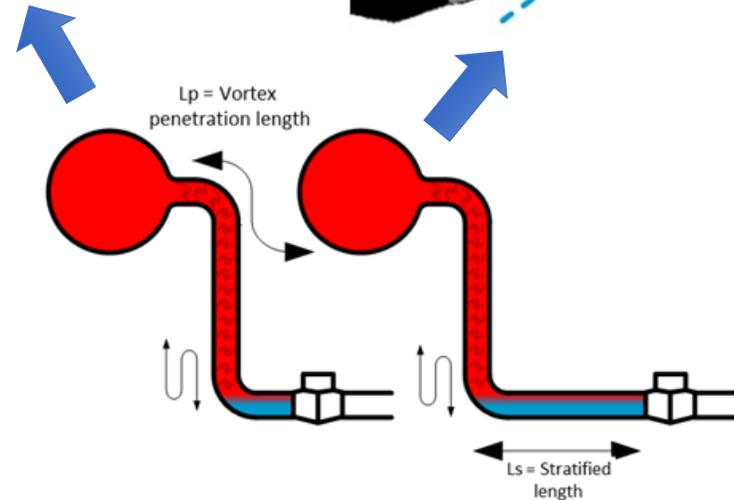
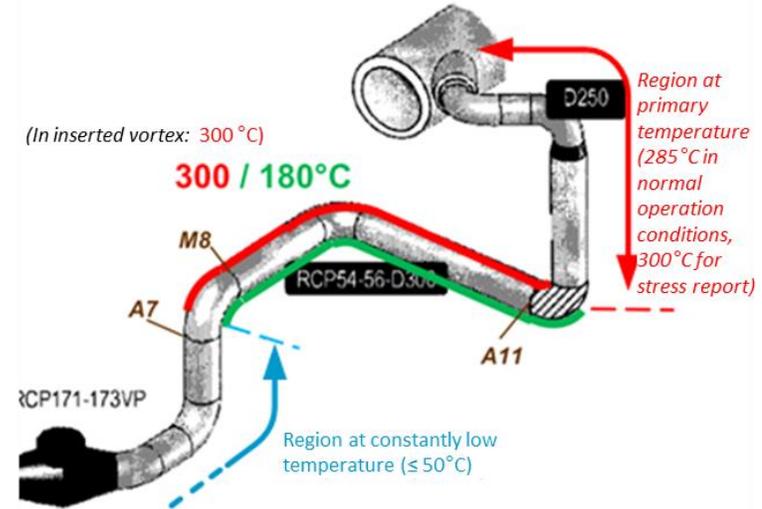
P4 1300 MW



P'4 1300 MW



N4 1450 MW



Constant load due to increasing stratification

La sensibilité des lignes

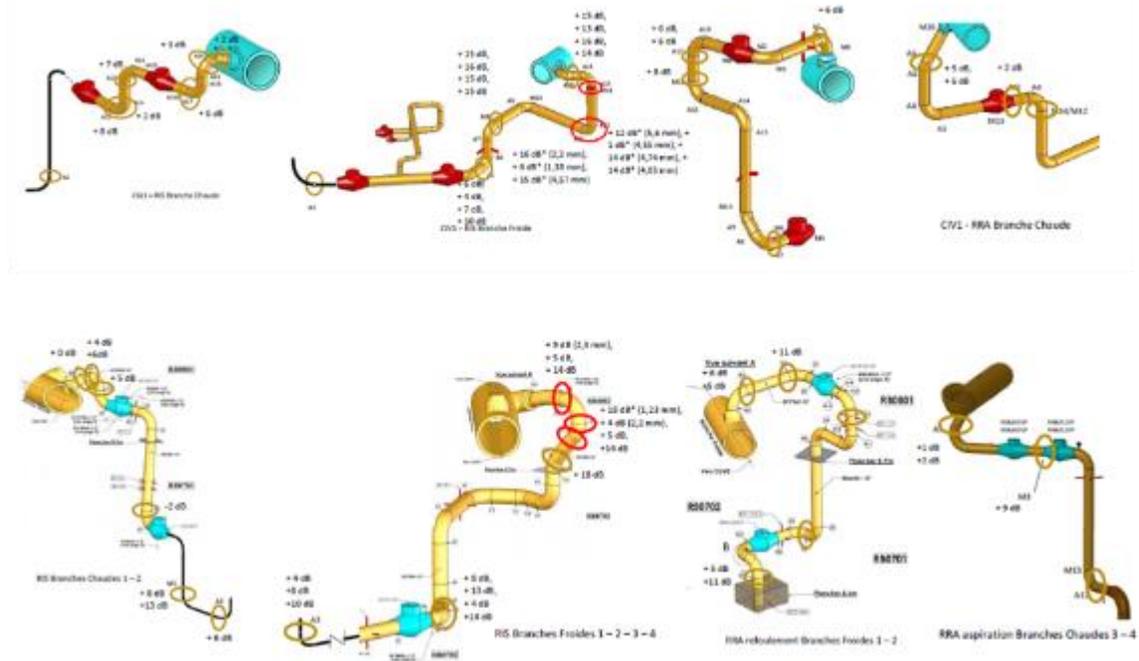
Les contrôles, les expertises et les analyses réalisés depuis mai dernier ont permis à EDF de définir un périmètre des réacteurs les plus sensibles à l'apparition du phénomène de CSC, d'identifier la zone spécifique à surveiller dans le cadre des programmes de maintenance et de poursuivre le programme de contrôles sur l'ensemble du parc.

Le 26 juillet 2022, l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN) a jugé la stratégie d'EDF « appropriée ».

Au total, 84 examens par ressuage sur site et 69 expertises en laboratoire ont été menés depuis l'apparition de cette problématique de corrosion sous contrainte à l'automne 2021, sur des réacteurs représentatifs de tous les paliers du parc nucléaire d'EDF.

Dans l'état actuel de nos connaissances, l'analyse des résultats de l'ensemble des expertises confirme le caractère prépondérant de la géométrie des lignes et nous permet de retenir un classement en différentes familles rappelées ci-dessous :

- des lignes peu ou très peu sensibles à l'apparition de la CSC sur les réacteurs de 900 MW (32 réacteurs) et les réacteurs de 1300 MW de type « P4 » (8 réacteurs) ;
- des lignes du circuit RIS des réacteurs de 1300 MW de type « P'4 » (12 réacteurs) et des circuits RIS et RRA des réacteurs N4 (4 réacteurs) sensibles ou fortement sensibles au phénomène de CSC.



La tenue mécanique des soudures

- Hauteur du défaut critique : hauteur déterminée par une approche codifiée en deçà de laquelle la tenue mécanique de la soudure est assurée pour tous les transitoires d'exploitation, courante, incidentelle ou accidentelle.
- Analyse de 91 soudures sur les systèmes RIS et RRA de tous les paliers.
- Prise en compte d'hypothèses conservatives :
 - Défaut simulé présent sur toute la circonférence de la tuyauterie
 - Lois de comportement des matériaux pénalisantes
- Le programme de calculs mécaniques est pratiquement terminé, en support à la stratégie de maintenance.

A date, tous les défauts expertisés en laboratoire et issus des examens non destructifs sont justifiés par une analyse à la rupture brutale sur un défaut axisymétrique en approche codifiée.

Poursuite des échanges techniques avec l'ASN et l'IRSN pour valider l'ensemble des hypothèses associées à ces résultats.

Les connaissances sur la cinétique du phénomène

L'ensemble des éléments disponibles à date :

- REX international (représentatif, mais en incluant tout de même le cas non représentatif des REB)
- Données expérimentales de CSC (nationales et internationales)
- Simulations numériques et études de sensibilité
- Données et études de la chimie primaire montrant une faible teneur en O₂ résiduel
- Résultats des expertises

met en évidence :

- Un amorçage de la CSC relativement précoce (plutôt < 10 ans)
- Combiné à des cinétiques de propagation < 0,5 mm/an pour les températures et chargements mécaniques enveloppe des BF

En perspective :

- Un programme d'essais de CSC complémentaire est en cours de définition pour compléter la connaissance et la quantification de la CSC dans des conditions très faiblement oxygénées (entre 5 et 200 ppb) susceptibles de se produire très ponctuellement et pour lesquelles aucune donnée expérimentale n'est disponible.
- Un programme de caractérisation plus poussée des oxydes dans les fissures expertisées