Réparation des soudures du circuit primaire impactées par la corrosion sous contrainte

EDF DIPDE
Marseille, France

I. Contexte et historique

II. Optimisation de la radioprotection pour les chantiers

III. Perspectives

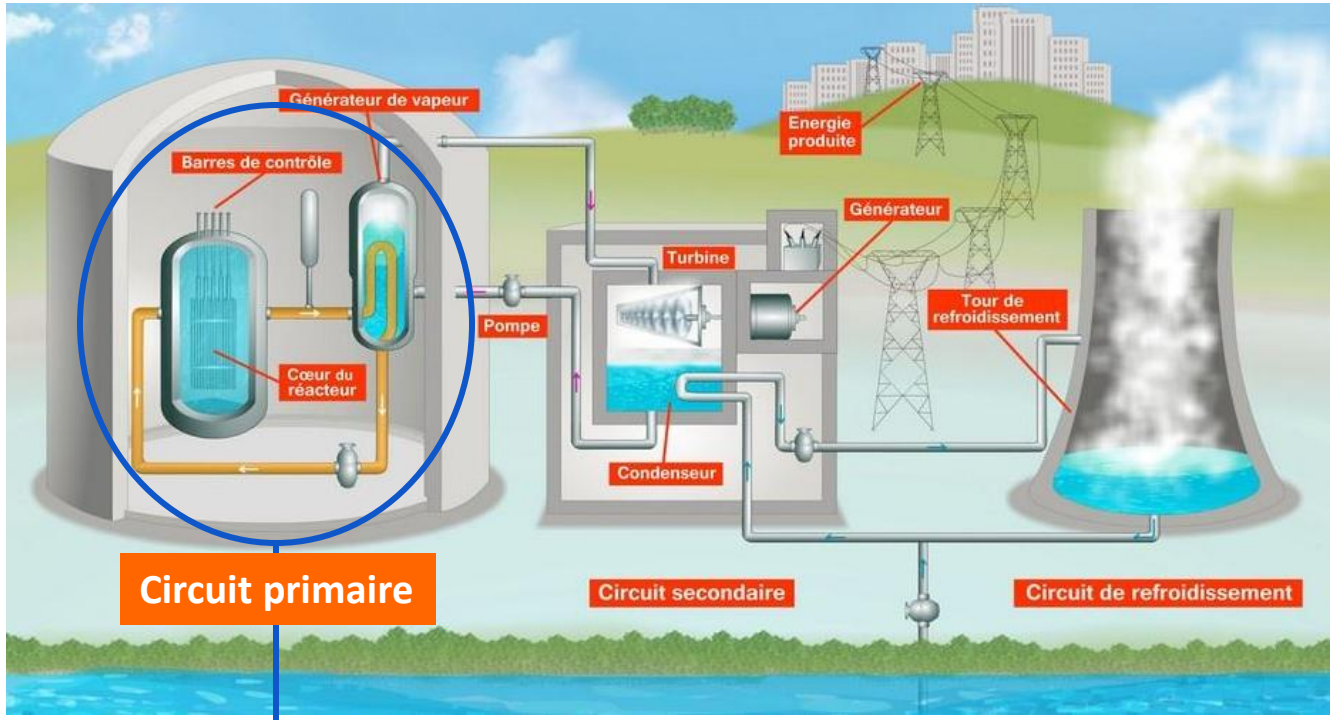
©EDF 2021 - Ce document est la propriété d'EDF - Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation écrite.

CONTEXTE ET HISTORIQUE

- **Périmètre**
- **Compréhension du phénomène de CSC**
- **Détection de la CSC**
- **Stratégie de réparation**

©EDF 2021 - Ce document est la propriété d'EDF - Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation écrite.

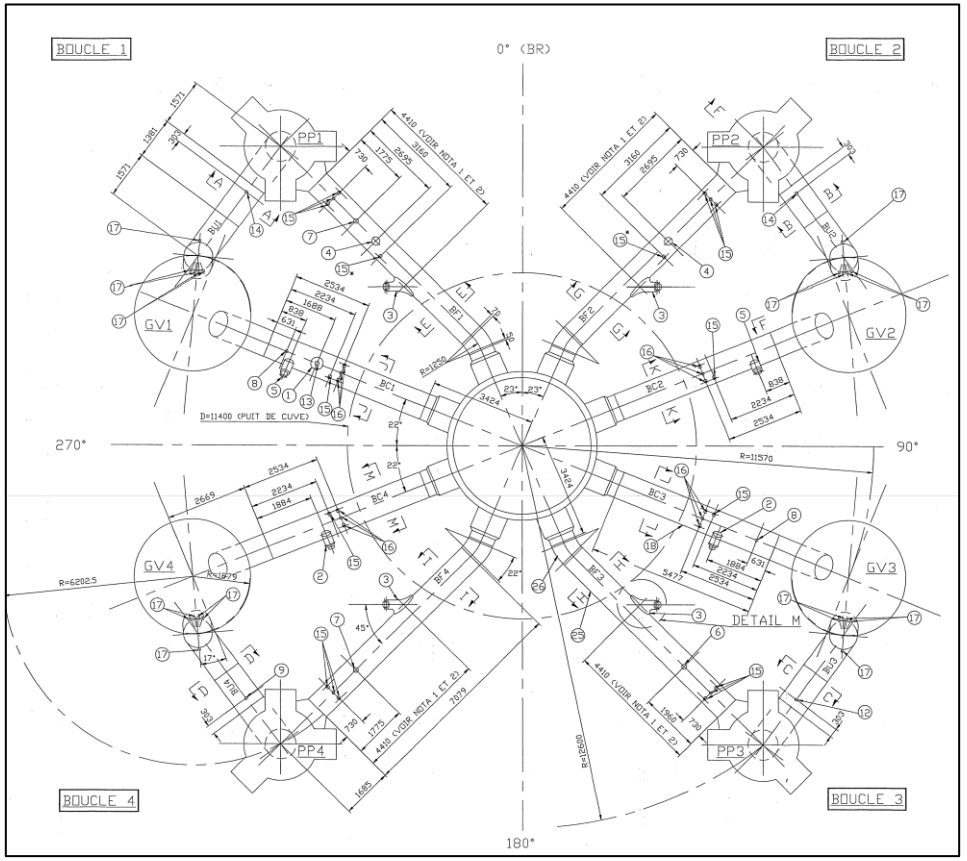
Principales lignes auxiliaires raccordées au CPP



Plus de 30 lignes sont raccordées au CCP

Diamètres compris entre 80 et 400 mm

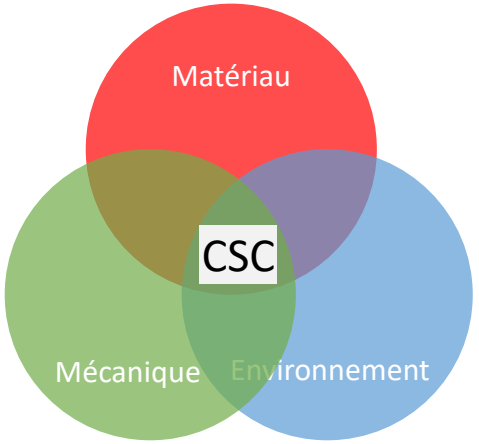
CPP et piquages du palier N4 :



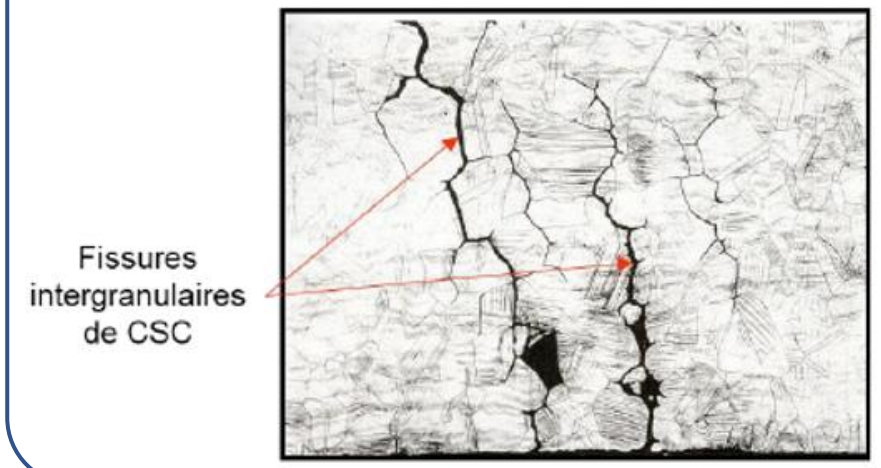
©EDF 2021 - Ce document est la propriété d'EDF - Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation écrite.

Qu’est-ce que la corrosion sous contrainte (CSC) ?

CSC = mode de corrosion caractérisé par la fissuration d’un **matériau** sous l’action conjuguée d’une **contrainte mécanique** et d’un **environnement agressif**



Cette dégradation conduit à l’amorçage d’une ou plusieurs **fissures intergranulaires** puis à leur propagation au sein du matériau



Matériau : aciers inoxydables austénitiques résistants à la corrosion

Environnement : la chimie du fluide du CPP est **particulièrement surveillée**

Contraintes mécaniques : variables selon les soudures, liées aux **opérations de fabrication**, en **particulier au soudage**, ainsi qu’aux **conditions d’exploitation** (pression, température et fréquence d’utilisation)

©EDF 2021 - Ce document est la propriété d'EDF - Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation écrite.

Détection de la CSC sur le parc EDF

Contrôles par ultrasons (UT) :
Dans le cadre de notre **Programme de Base de Maintenance Préventive** (PBMP), certaines soudures des circuits auxiliaires du CPP font l'objet d'un suivi en service pour leur sensibilité à la fatigue thermique

Octobre 2021 :
Présence d'une **indication sur une soudure de la ligne RIS Branche Froide** de Civaux 1

➔ Soudure déposée pour **analyses métallurgiques** au LIDEC (Laboratoire Chaud sur le CNPE de Chinon)

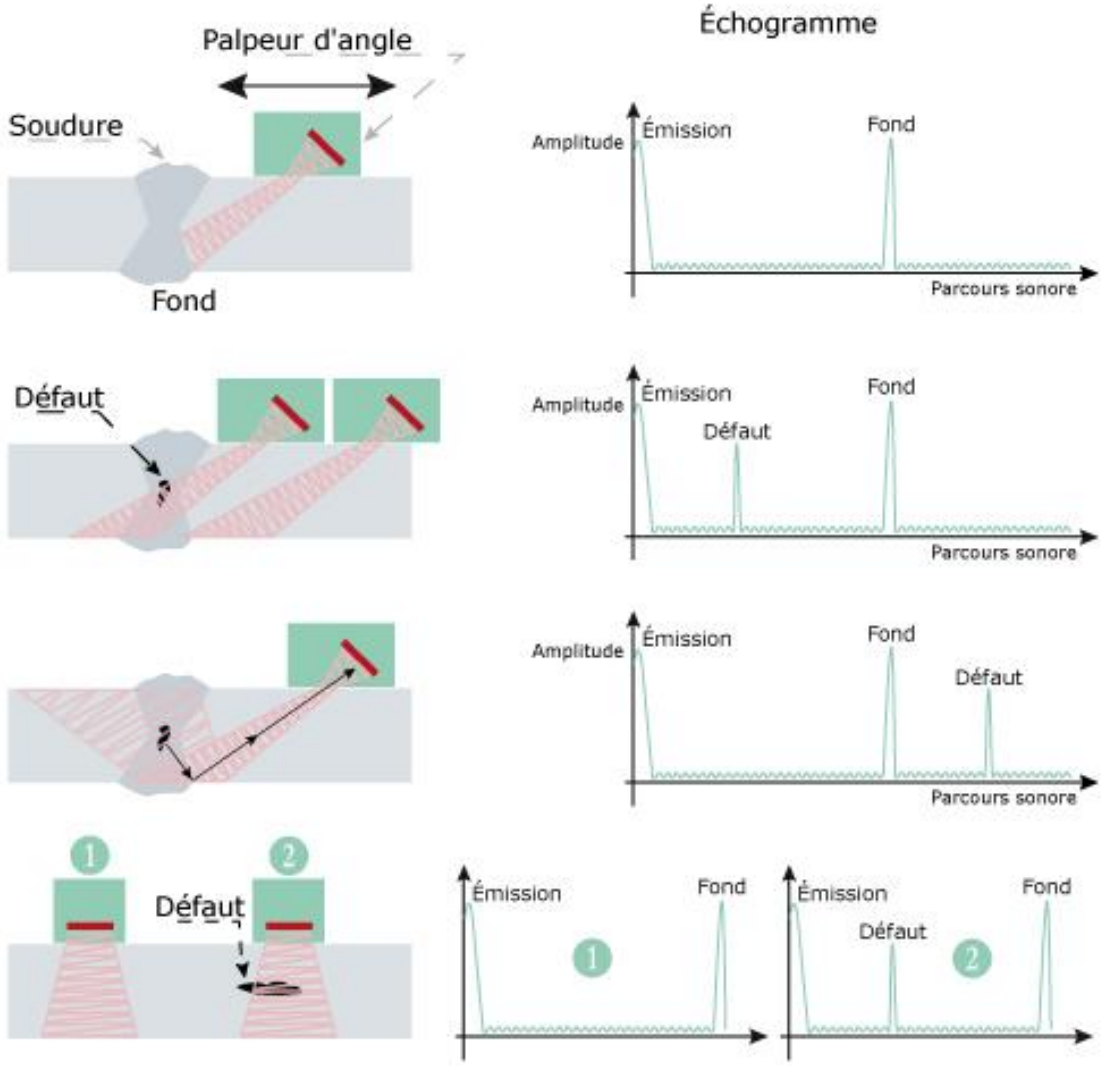


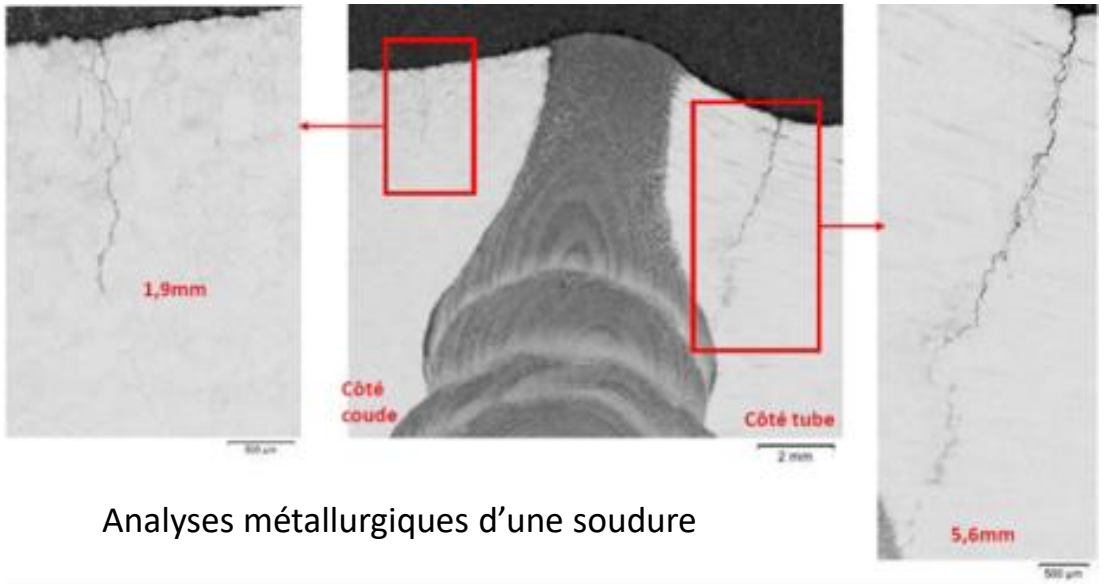
Schéma de principe du contrôle UT

©EDF 2021 - Ce document est la propriété d'EDF - Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation écrite.

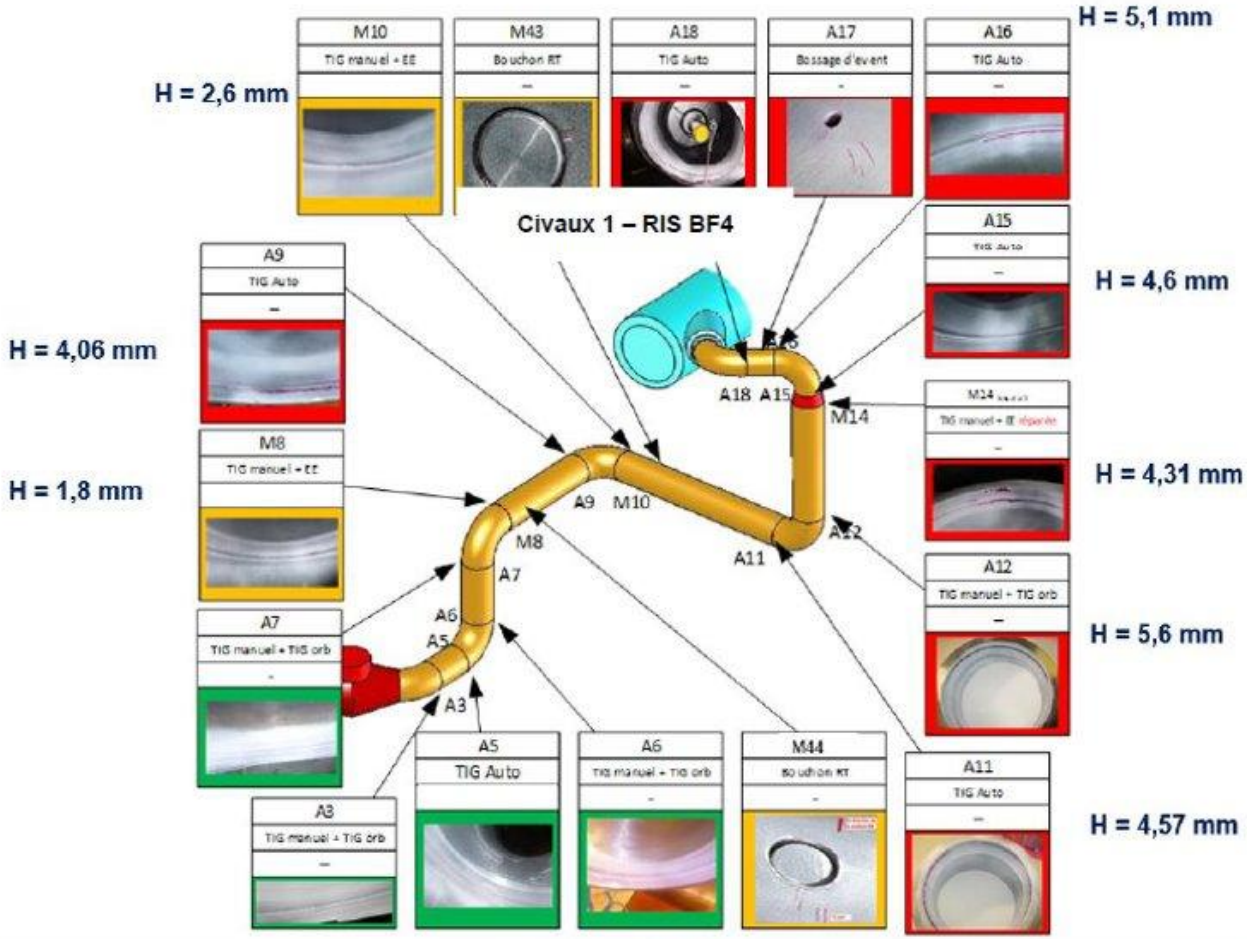
Analyses métallurgiques au LIDEC :

Mise en évidence de **fissures de plusieurs millimètres** sur le métal de base à proximité du cordon de soudure

➔ Autres soudures de la ligne déposées pour analyse, celles-ci présentant également des fissures de CSC



Analyses métallurgiques d'une soudure



Hauteurs des indications sur la boucle RIS BF4 de Civaux 1

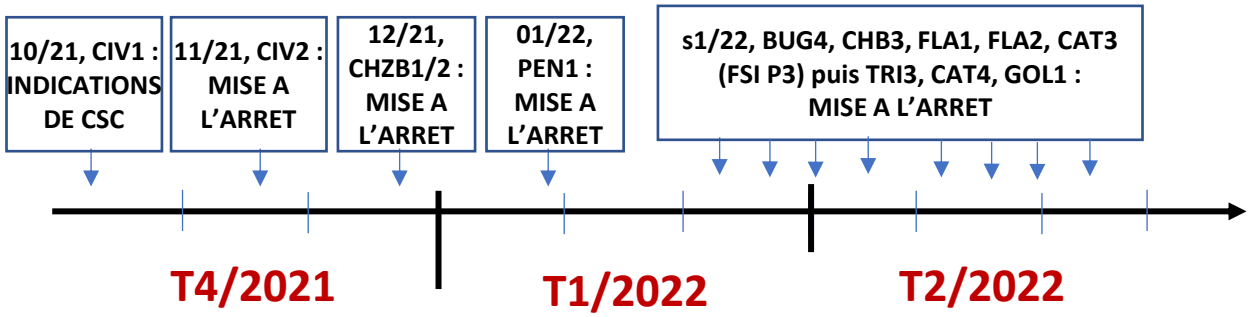
©EDF 2021 - Ce document est la propriété d'EDF - Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation écrite.

Octobre 2021 :

EDF met en place une « Task Force » avec différentes parties prenantes :

- **UTO et DIPDE** : Interventions de déposes des tronçons
- **DI** : Développement de moyens de contrôle pour détecter la CSC
- **LIDEC** : Expertises des soudures déposées
- **DT** : Calculs des hauteurs critiques des défauts et vitesses de propagation
- **R&D** : Simulations numériques de soudage (SNS)

➔ Objectifs : **borner le phénomène, identifier les différents niveaux de sensibilité** des lignes auxiliaires du CCP et **définir une stratégie de traitement**

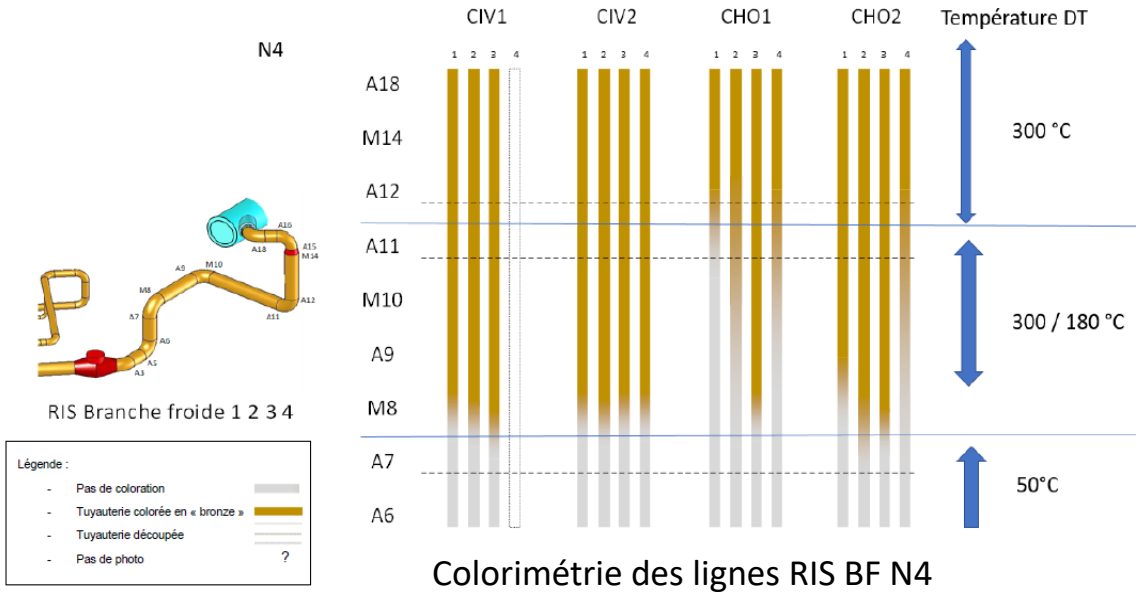


13 tranches arrêtées en 2021/2022 pour expertises CSC

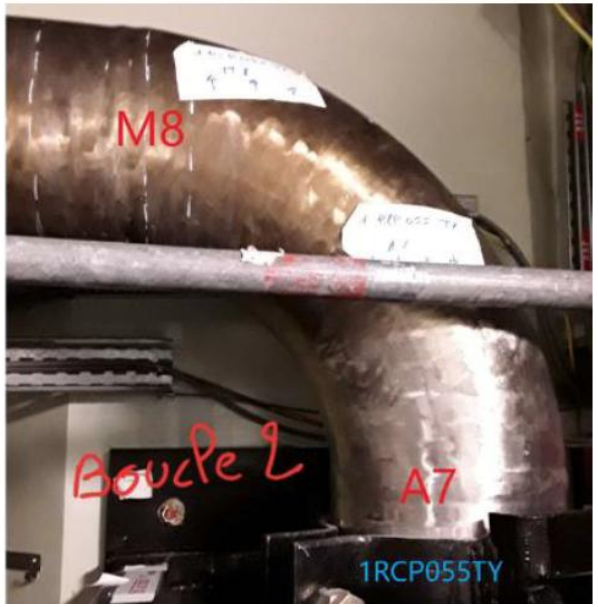
©EDF 2021 - Ce document est la propriété d'EDF - Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation écrite.

Résultats des expertises menées sur le parc

Les **températures de fonctionnement** exercent une influence sur la sensibilité des lignes à la CSC :

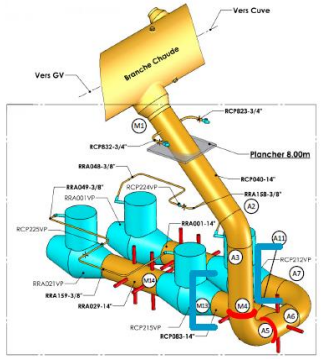


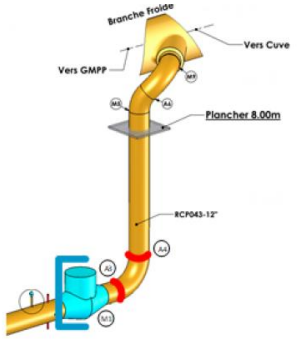
Colorimétrie des lignes RIS BF N4

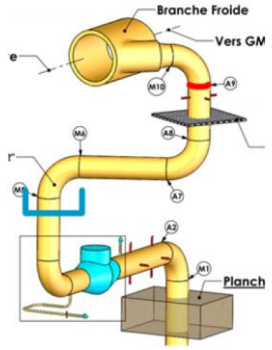


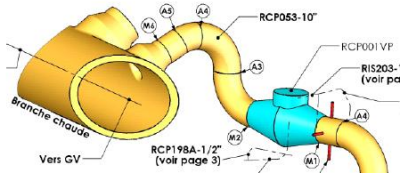
Aspect extérieur

La **géométrie de la ligne** constitue un facteur important du phénomène observé (ex : stratification thermique sur tronçons horizontaux) :









©EDF 2021 - Ce document est la propriété d'EDF - Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation écrite.

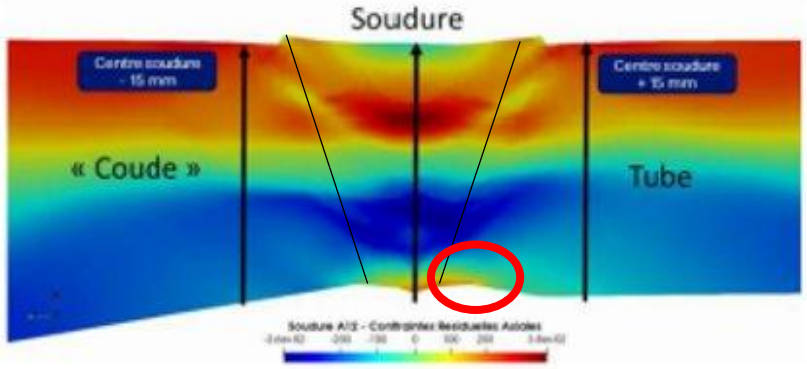
Le **procédé de soudage** est également un paramètre influent :

- Il engendre un durcissement du métal (écrouissage) plus ou moins important en fonction du procédé mis en œuvre et l'apport de chaleur nécessaire.

Mesures de dureté :

- … qui va engendrer une intensification de la contrainte (en traction) au niveau du pied de cordon de soudure :

Simulation Numérique de Soudage des contraintes résiduelles



Métal moins ductile
+
contrainte de traction
=
Risque d'amorçage de fissure CSC sur le métal de base en pied de cordon de soudure

©EDF 2021 - Ce document est la propriété d'EDF - Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation écrite.

Résultats des expertises menées sur le parc

Octobre 2022 :

Intégration de l'ensemble des soudures « réparées » toutes lignes confondues au PBMP, soit :

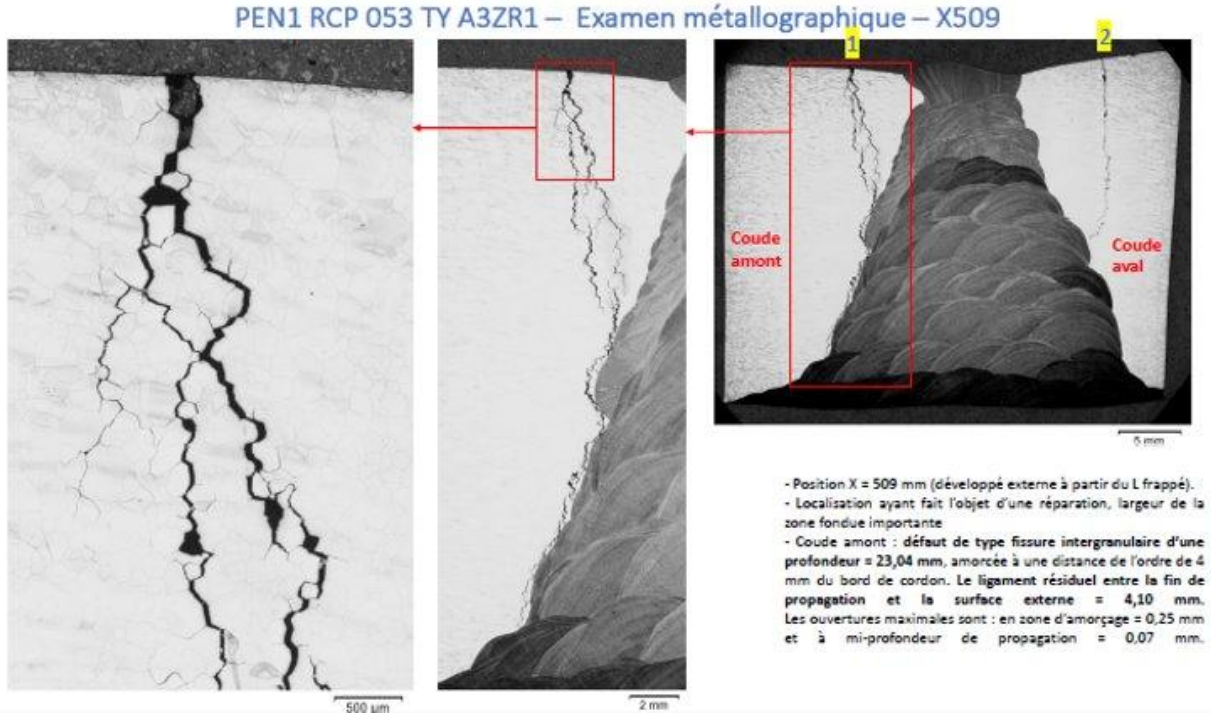
- **269 soudures sur les circuits RIS / RRA**
- **100 soudures sur la LEP (pressuriseur)**

Fin 2022 :

Suivi de la soudure A3 sur RIS BC de Penly 1 (avait fait l'objet de 2 réparations : désalignement au montage + défaut de soudage)

➔ Les UT révèlent une indication d'**environ 20mm**

➔ Analyse métallurgique confirme une fissure de **23,04 mm** (sur un tube d'épaisseur d'environ 30 mm)



Les résultats des expertises nationales ont permis de définir différents niveaux de sensibilité des lignes

	CP0	CPY	P4	P'4	N4
RIS BF	Très peu sensible	Très peu sensible	Peu sensible	Fortement sensible	Fortement sensible
RRA	Très peu sensible	Peu sensible (RRA aspiration BC)	Très peu sensible	Très peu sensible	Sensible (RRA aspiration BC)

Les autres lignes auxiliaires (RCV, Pressuriseur, etc.) sont jugées peu sensibles à la CSC

©EDF 2021 - Ce document est la propriété d'EDF - Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation écrite.

RADIOPROTECTION

- Environnement et étapes d’un chantier

- Actions d’optimisation

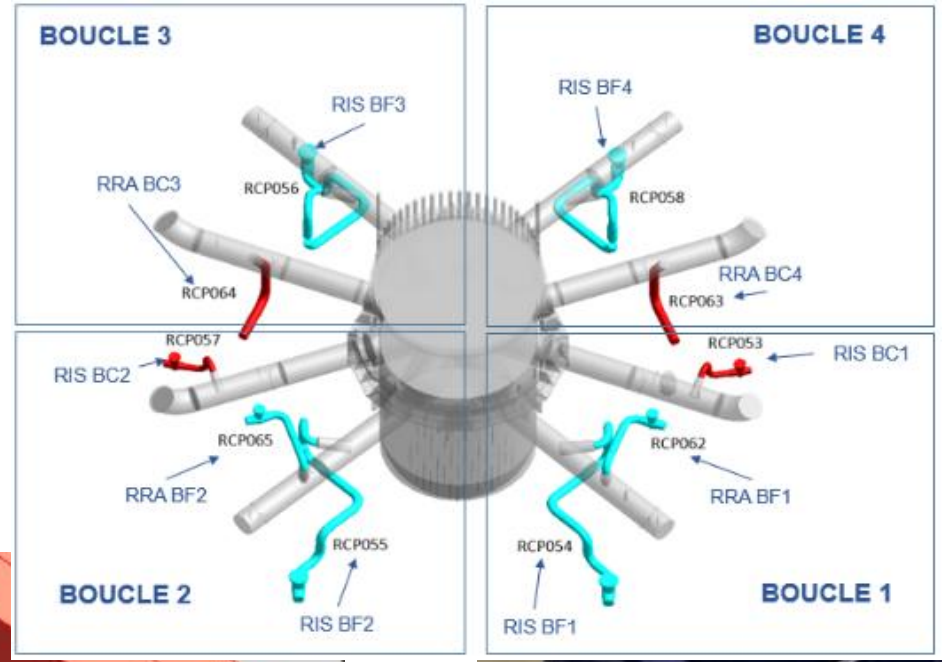
- Bilan RP des chantiers de CSC jusqu’à fin 2024

- REX et orientations

©EDF 2021 - Ce document est la propriété d'EDF - Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation écrite.

Un environnement exigeant

Vue 3D des locaux sur palier N4 (1450 MW) :



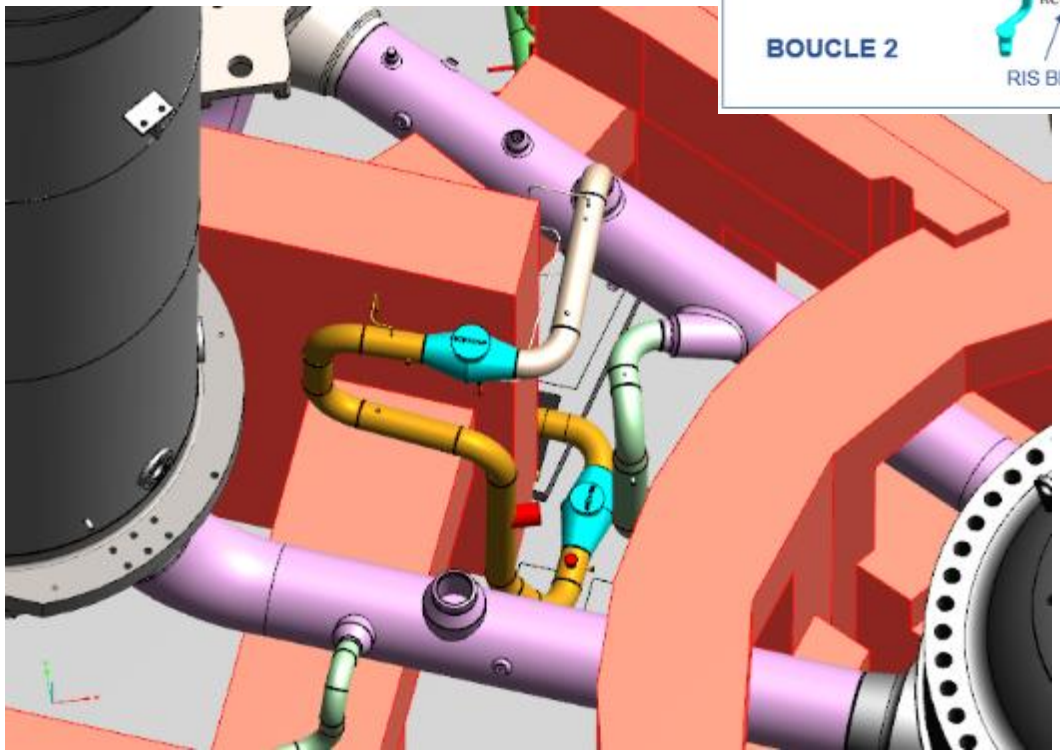


Photo issue d'un chantier sur palier PP4 (1300 MW) :

©EDF 2021 - Ce document est la propriété d'EDF - Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation écrite.

Remplacement d'un tronçon de tuyauterie : étapes clés d'un chantier

Dose collective optimisée ~30 H.mSv

Valeurs indicatives pour 1 tronçon remplacé, soit 2 soudures

Varient selon contexte radiologique et localisation des soudures

Phase de dépose	H.mSv
Préparation (hors contrat): - Dépose des interférents - Dépose des calorifuges - Pose des protections biologiques/sas/servitudes	0,50
Cartographie de débit de dose	0,20
Relevé dimensionnel (topo) initial	0,40
Pose des accessoires de manutention/levage et des dispositifs de bridage des lignes	2,30
Marquage de la ligne de coupe **Pose de la machine de coupe** **Coupe de la tuyauterie** **Retrait de la machine de coupe**	**6,50**
Levage du tronçon de tuyauterie	0,15
Pose des obturateurs blindés	0,20
Décontamination manuelle	0,10
Relevé dimensionnel (topo) après découpe	0,15
Total dépose	*10,35*

Phase de repose	H.mSv
Acheminement du tronçon neuf	0,10
Cartographie de débit de dose	0,20
Retrait des obturateurs blindés	0,20
Pose de la machine de chanfreinage **Chanfreinage des embouts** **Dépose de la machine de chanfreinage**	**2,00**
Relevés dimensionnels (topo) après usinage	0,15
Pose des accessoires de manutention/levage	1,50
Transfert du tronçon neuf vers la zone de travail pour accostage	0,10
Pose du système d'inertage	0,30
Accostage du tronçon neuf	0,50
Soudage manuel (passes racines) **Pose de la machine de soudage orbital** **Soudage orbital téléopéré** **Dépose de la machine de soudage orbital**	**8,00**
Dépose du système d'inertage	0,30
Tirs radiographiques	0,60
Contrôle de propreté interne	0,40
Relevés dimensionnels (topo) finaux	0,10
Repli de chantier (matériel titulaire)	2,00
Repli de chantier (hors contrat) : - Dépose des protections biologiques/sas/servitudes - Repose des calorifuges - Repose des interférents	0,50
Total repose	*16,95*

©EDF 2021 - Ce document est la propriété d'EDF - Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation écrite.

Optimisation de la radioprotection

- Niveau d'eau
- Protections biologiques
- Décontamination des embouts
- Sas de confinement
- Matériels
- Entrainement
- Supervision
- Evacuation des tronçons déposés
- Protections respiratoires
- Bonnes pratiques

Maintien en eau des circuits aussi longtemps que possible (installation des matériels, dépose des interférents et début de la coupe)

➔ ~15% de réduction du DED

Matelas de plomb standard : pose en direct sur tuyauteries (jusqu'à 1,50m de chaque côté de la ligne de coupe)

Rubans de T-flex® : sur les petites lignes présentant des points irradiants (abaisse le debit de dose "trajet").

➔ ~10% à 20% de réduction du DED

©EDF 2021 - Ce document est la propriété d'EDF - Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation écrite.

Niveau d'eau
Protections biologiques
Décontamination des embouts
Sas de confinement
Matériels
Entrainement
Supervision
Evacuation des tronçons déposés
Protections respiratoires
Bonnes pratiques

Spectre de radionucléides présents :

Activité déposée (en GBq/m²) dans le circuit primaire :

AD moy (GBq/m²)	Avant oxygénation & purification						Après oxygénation & purification					
CIRCUITS	^{58}Co	^{60}Co	^{54}Mn	^{59}Fe	^{124}Sb	^{110m}Ag	^{58}Co	^{60}Co	^{54}Mn	^{59}Fe	^{124}Sb	^{110m}Ag
RCP	3,32	1,53	0,16	0,07	0,07	0,05	3,08	1,29	0,13	0,08	0,12	0,04
RCV	0,99	0,23	0,03	0,01	0,04	0,14	1,30	0,38	0,05	0,02	0,06	0,39
RRA	0,79	0,16	0,03	0,01	0,03	0,04	1,10	0,36	0,07	0,06	0,08	0,06
REN	*2,84*	*0,19*	*0,14*	*0,09*	*0,57*	*1,98*	*1,71*	*0,52*	*0,13*	*0,03*	*0,12*	*0,60*
RIS	*1,61*	*0,48*	*0,06*	*0,03*	*0,07*	*0,08*	*1,63*	*0,66*	*0,12*	*0,04*	*0,09*	*0,03*

⇨ **Contamination surfacique dans le circuit RIS estimée à ~200 000 Bq/cm²**

Décontamination manuelle des embouts : utilisation de lingettes imbibées de produit décontaminant

➔ Objectif pour la phase de dépose :
Réduire à **< 40 Bq/cm²**
Limiter le port des protections respiratoires aux phases les plus sensibles

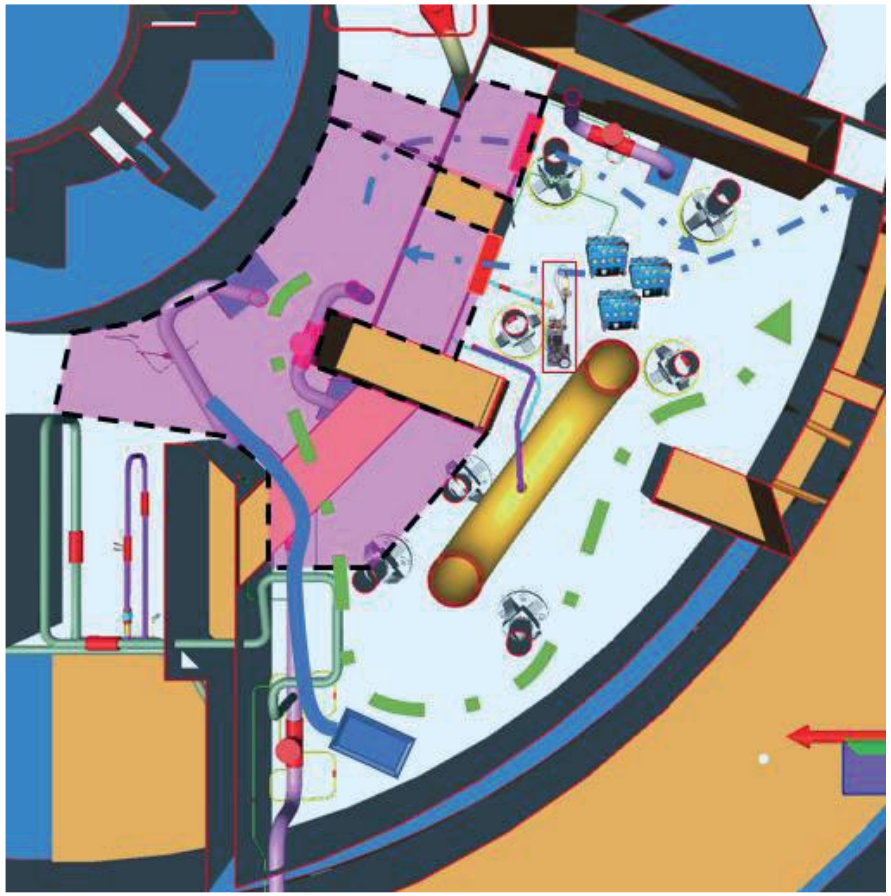
➔ Objectif pour le soudage :
Réduire à **< 40 Bq/cm²** à l'intérieur de la tuyauterie et **< 4 Bq/cm²** à l'extérieur
Maintien des protections respiratoires pour les premières passes racines

©EDF 2021 - Ce document est la propriété d'EDF - Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation écrite.

Optimisation de la radioprotection

- Niveau d'eau
- Protections biologiques
- Décontamination des embouts
- **Sas de confinement**
- Matériels
- Entrainement
- Supervision
- Evacuation des tronçons déposés
- Protections respiratoires
- Bonnes pratiques

Description précise des sas de confinement :



Séparation des flux :

Personnel

Matériel

Aspiration à la source

Sas vinyle multi-couches

Balatum décontaminable au sol

Décontaminations régulières :

- **Particulièrement** avant la phase de repose
- **Très particulièrement** avant le soudage

Maintenir une bonne dépression dans le sas :
Difficile compte tenu de l'exiguïté/ergonomie des locaux :

©EDF 2021 - Ce document est la propriété d'EDF - Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation écrite.

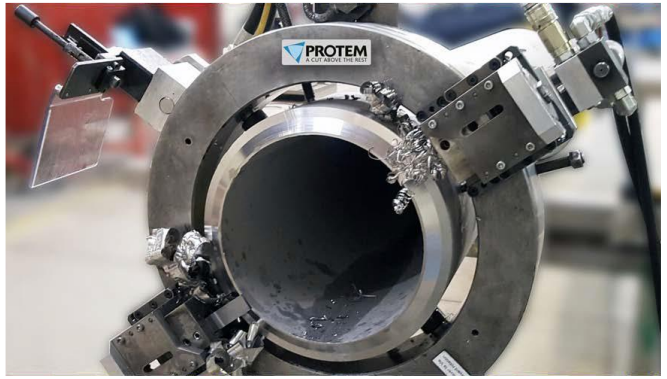
Optimisation de la radioprotection

- Niveau d'eau
- Protections biologiques
- Décontamination des embouts
- Sas de confinement
- **Matériels**
- **Entrainement**
- Supervision
- Evacuation des tronçons déposés
- Protections respiratoires
- Bonnes pratiques

Machines de découpe orbitale :

- Lubrification automatique
- Système de récupération
- Génération de copeaux longs et « enroulants »

→ Utilisation de pinces (distance ~60 cm)



Machines de chanfreinage :

- Machines téléopérées automatiques
- Aucune intervention humaine dans le sas
- Génération de petits copeaux incandescents

→ Utilisation de protections des avants-bras « manchettes de soudeur »

Soudage :

- Machines de soudage orbital semi-automatiques
- Passe racine manuelle
- Modifications d'équipements qualifiés coûteuses

Mai 2024 : Première soudure de montage effectuée 100% en automatique

➔ Dosimétrie divisée par 3 environ

Optimisation de la dosimétrie pour les spécialités les plus dosées :

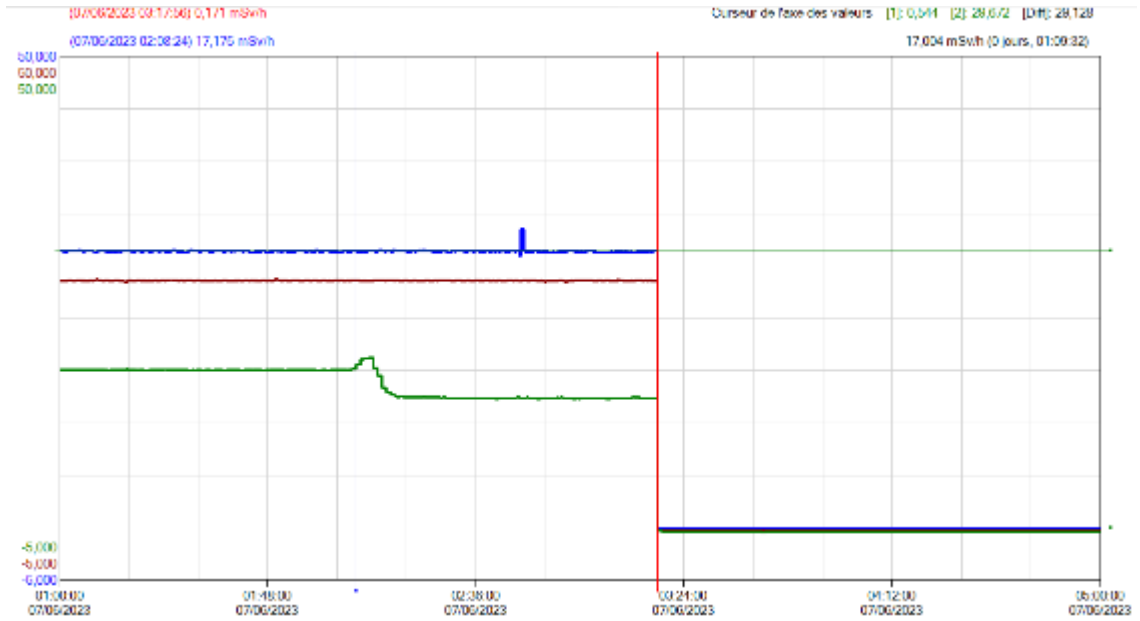
- Entrainements sur maquette
- Sous-traitance auprès de sociétés spécialisées : prise de côtes, tuyautage, manutention, etc.

©EDF 2021 - Ce document est la propriété d'EDF - Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation écrite.

Niveau d'eau
Protections biologiques
Décontamination des embouts
Sas de confinement
Matériels
Entrainement
Supervision
Evacuation des tronçons déposés
Protections respiratoires
Bonnes pratiques

Instrumentation « PSPR » utilisée pour suivre l'efficacité des rinçages du CPP :

Rinçage = action d'optimisation RP **essentielle** pour ces chantiers
Sa durée est d'environ 30 minutes seulement



Réduction du DED de 18 mSv/h à 0,6 mSv/h
➔ ~95% de réduction du DED

©EDF 2021 - Ce document est la propriété d'EDF - Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation écrite.

Optimisation de la radioprotection

Niveau d'eau

Protections biologiques

Décontamination des embouts

Sas de confinement

Matériels

Entrainement

Supervision

Evacuation des tronçons déposés

Protections respiratoires

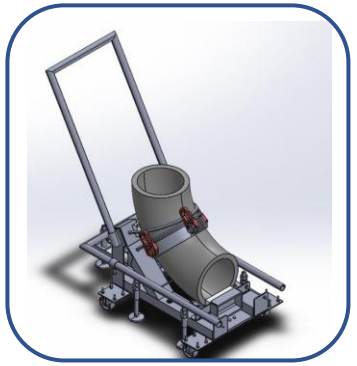
Bonnes pratiques

Evacuation des tronçons usés :

Chariots de transport sur-mesure conçus pour supporter 1 tronçon + 1 à 2 couches de protections biologiques

Cheminement déterminé avec le SPR, emballage vinyle, suivi régulier du DED

Evacuations programmées hors des pics d'affluence



Utilisation de différentes protections respiratoires :

Découpe orbitale semi-automatique	Découpe manuelle	Manutention du tronçon avant mise en place d'obturateurs	Soudage manuel sur parties contaminées
Heaume ventilé	TEV renforcée	Heaume ventilé OU Cagoule Autonome à Ventilation Assistée (CAVA)	Speedglass OU Swissair OU Cleanspace

©EDF 2021 - Ce document est la propriété d'EDF - Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation écrite.

Optimisation de la radioprotection

- Niveau d'eau
- Protections biologiques
- Décontamination des embouts
- Sas de confinement
- Matériels
- Entrainement
- Supervision
- Evacuation des tronçons déposés
- Protections respiratoires
- **Bonnes pratiques**

Obturateurs blindés limitant l'élévation du DED à la dépose du 1er tronçon

➔ Réduction du DED d'un facteur 2 à 5 selon les configurations

Gamma camera permettant de caractériser les termes sources prépondérants de l'environnement

➔ Optimisation de la pose des protections biologiques

Bracelets vibrants relayant l'alarme sonore de dosimètre en environnement bruyant

Étiquettes adhésives pour **améliorer la signalisation des points irradiants**

➔ Utilité prouvée dans le cadre de contextes radiologiques difficiles

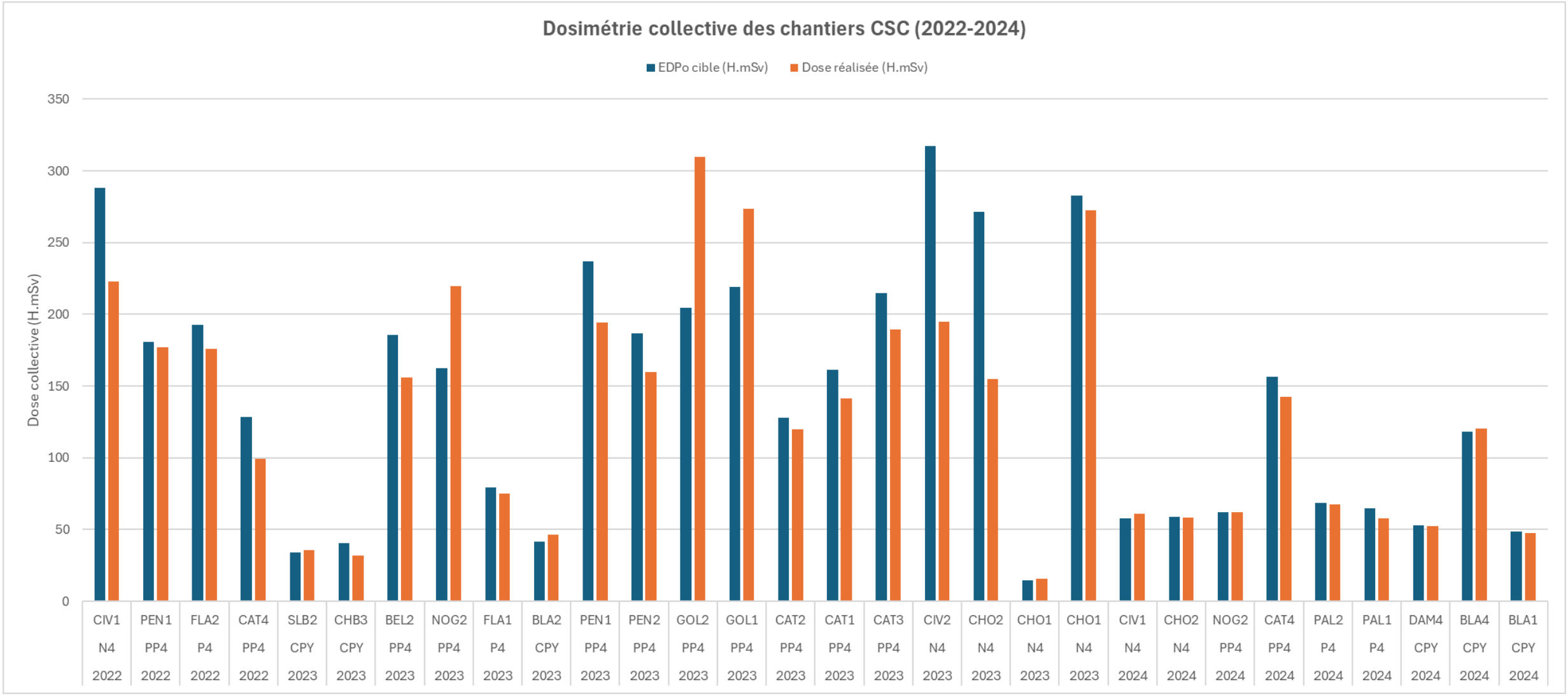
©EDF 2021 - Ce document est la propriété d'EDF - Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation écrite.

Bilan radioprotection : dose collective

Dose réalisée (H.mSv)		
2022	2023	2024
675	2600	670

Soudures réparées		
2022	2023	2024
74	228	49

Dose moyenne par soudure réparée (H.mSv)		
2022	2023	2024
10,5	11,3	18,3

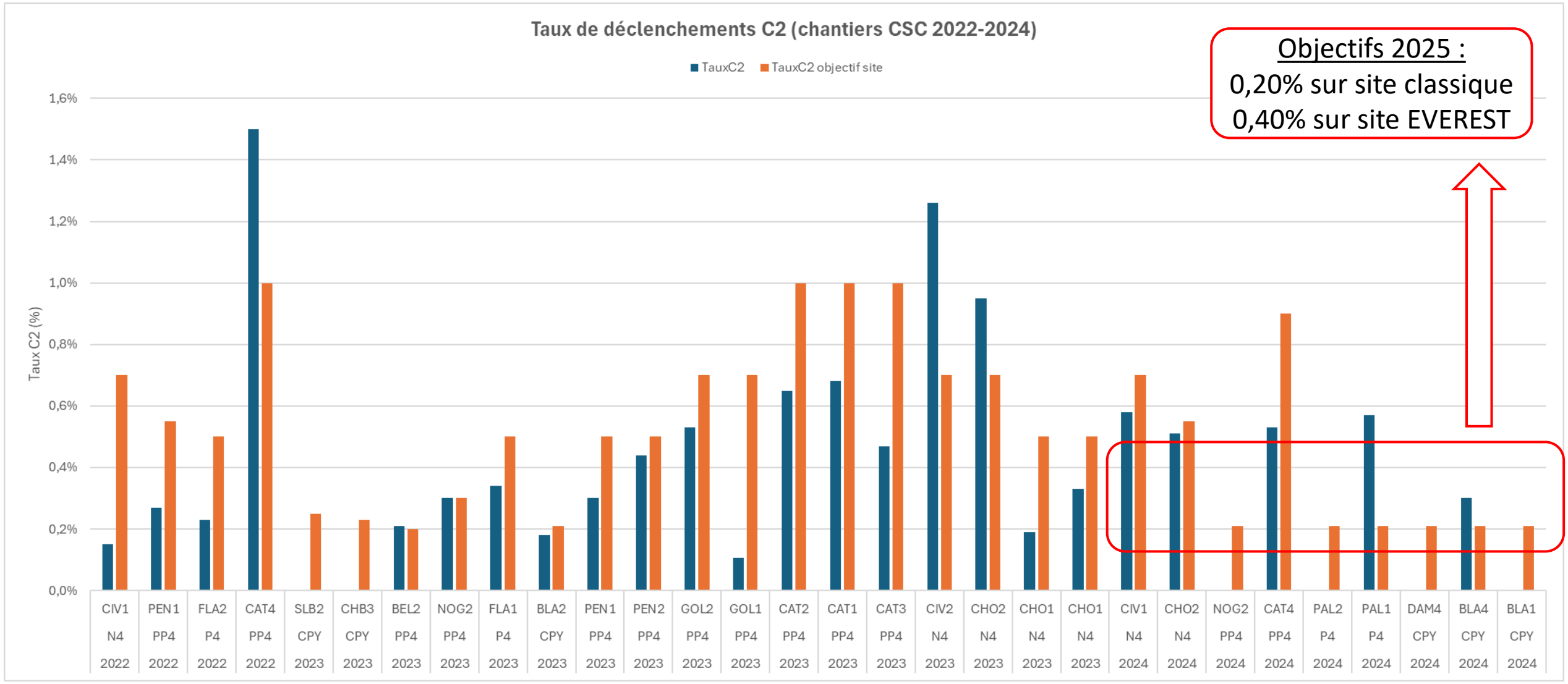


©EDF 2021 - Ce document est la propriété d'EDF - Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation écrite.

Bilan radioprotection : contamination

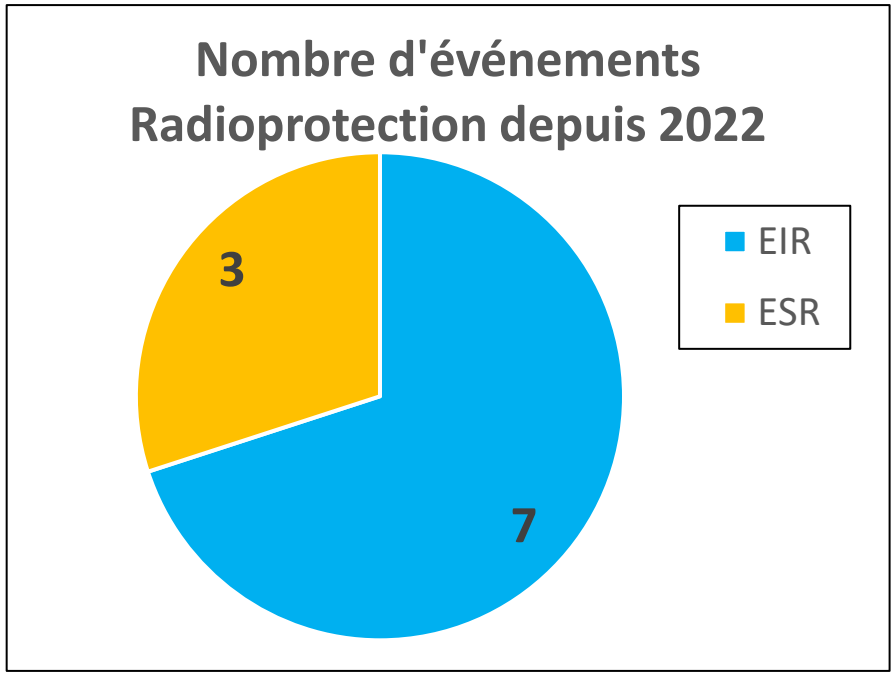
Maîtrise de la propreté radiologique : des progrès au fil des chantiers

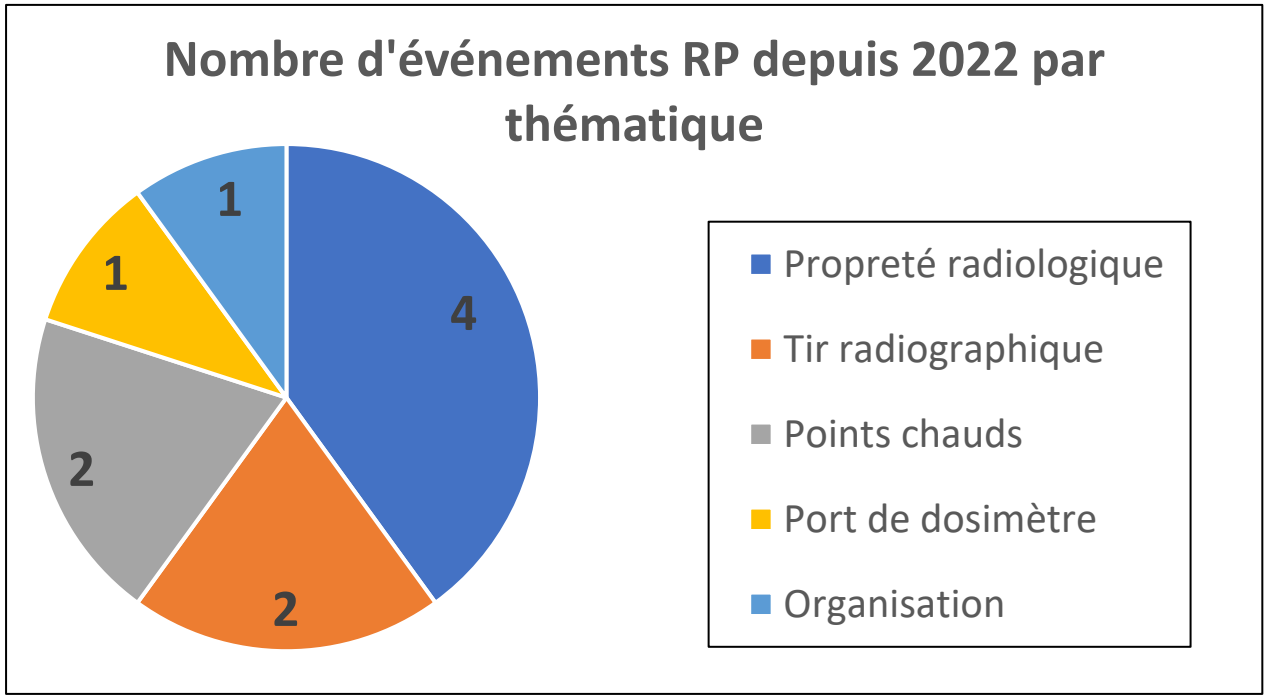
Principalement liés à la qualité des sas et leur maintien en propreté : maîtrise des flux d'air, décontaminations ciblées et fréquence adaptée



©EDF 2021 - Ce document est la propriété d'EDF - Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation écrite.

Bilan radioprotection : événements de radioprotection





Un événementiel satisfaisant compte tenu du grand nombre de chantiers réalisés

Ces événements ont orienté les grands axes de travail :

- La propreté radiologique
- La prise en compte et gestion des points chauds (irradiation) dans l'environnement de travail

©EDF 2021 - Ce document est la propriété d'EDF - Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation écrite.

PERSPECTIVES

- **Limiter l'apparition de CSC :**
  - Chanfreins étroits
  - Arasage interne / téléopéré
  - Procédé MSIP®
- **Procédés alternatifs de réparation**

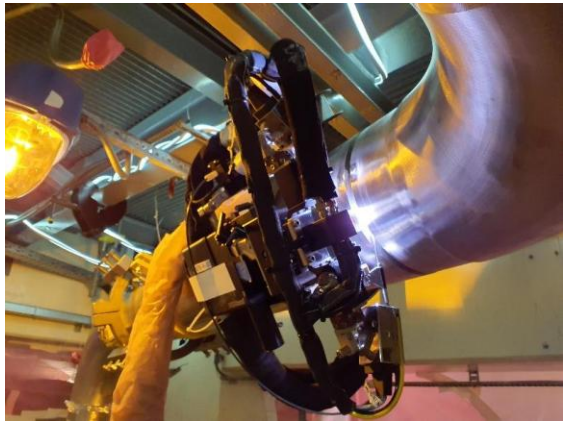
©EDF 2021 - Ce document est la propriété d'EDF - Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation écrite.

Limiter l’apparition de CSC : chanfreins étroits (Narrow Gap)

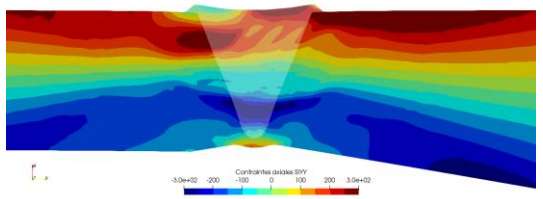
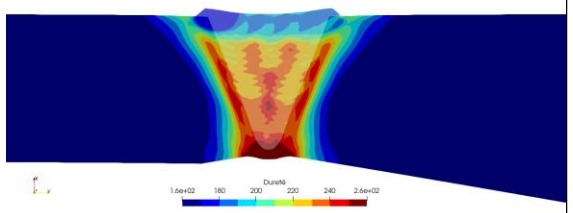
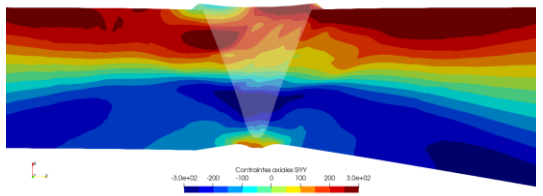
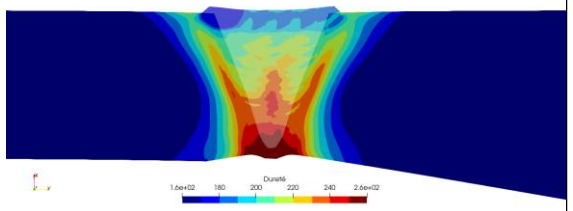
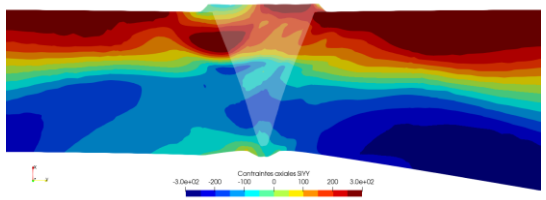
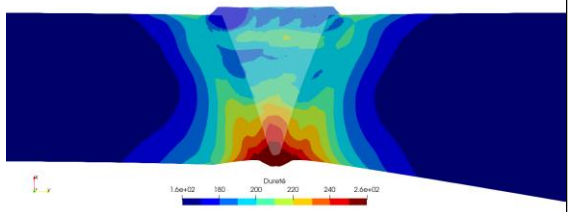
Objectif :

- Limiter le volume de métal d’apport déposé
- Diminuer le retrait de soudage
- Diminuer le niveau des contraintes résiduelles de soudage

Ce type de chanfrein requiert l’utilisation d’outillage 100% mécanisé



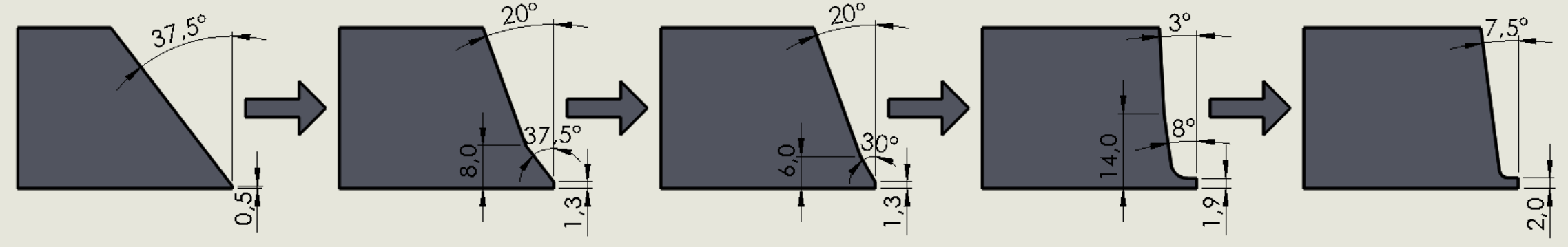
Machine orbitale de soudage téléopéré

Contraintes résiduelles		Dureté
	Grande ouverture	
	Moyenne ouverture	
	Faible ouverture	

©EDF 2021 - Ce document est la propriété d'EDF - Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation écrite.

Limiter l'apparition de CSC : chanfreins étroits (Narrow Gap)

Evolution des chanfreins / Procédés de soudage



Chanfrein 1	Chanfrein 2	Chanfrein 3	Chanfrein 4	Chanfrein 5
Procédé : TIG manuel	Procédé : TIG manuel + mécanisé	Procédé : TIG manuel + mécanisé	Procédé : TIG totalement mécanisé	Procédé : TIG totalement mécanisé
Volume : **5,4kg**	Volume : **3,9kg**	Volume : **3,3kg**	Volume : **2,4kg**	Volume : **2,0kg**
Nombre de passes : **47**	Nombre de passes : **39**	Nombre de passes : **35**	Nombre de passes : **22**	Nombre de passes : **19**
Retrait moyen : **>10mm**	Retrait moyen : **8,3mm**	Retrait moyen : **7,5mm**	Retrait moyen : **5,4mm**	Retrait moyen : **4,9mm**

Procédés historiques

Procédés développés et mis en œuvre dans le cadre du CSC

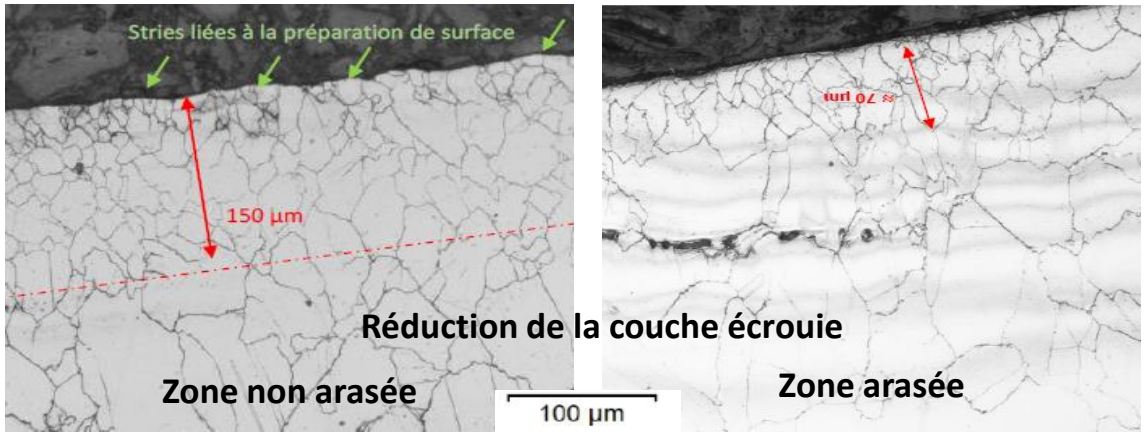
©EDF 2021 - Ce document est la propriété d'EDF - Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation écrite.

Limiter l'apparition de CSC : arasage interne

<u>Objectif :</u> diminuer le risque d'amorçage de la CSC par :

- La suppression des singularités géométriques
- La réduction de la couche écrouie en surface
- La mise en compression de la peau

En effet, les expertises ont mis en évidence que les soudures ayant fait l'objet d'un arasage interne ne présentaient pas de défauts de CSC.



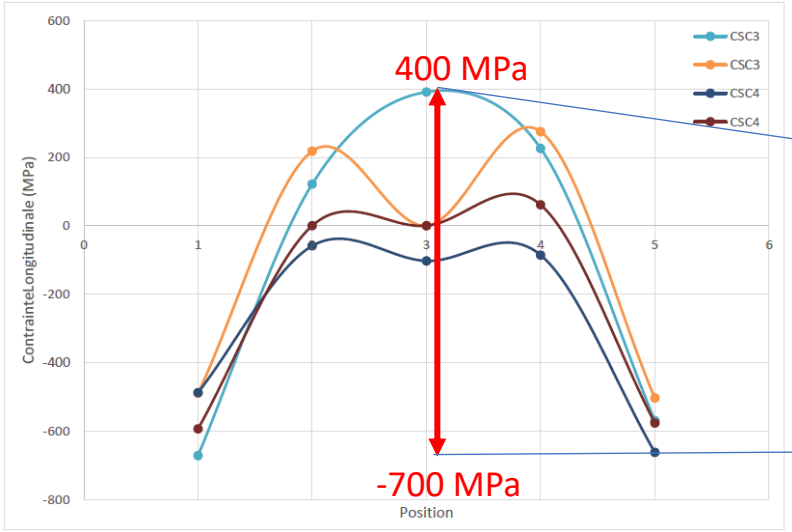


Figure 5: profil des contraintes résiduelles longitudinales

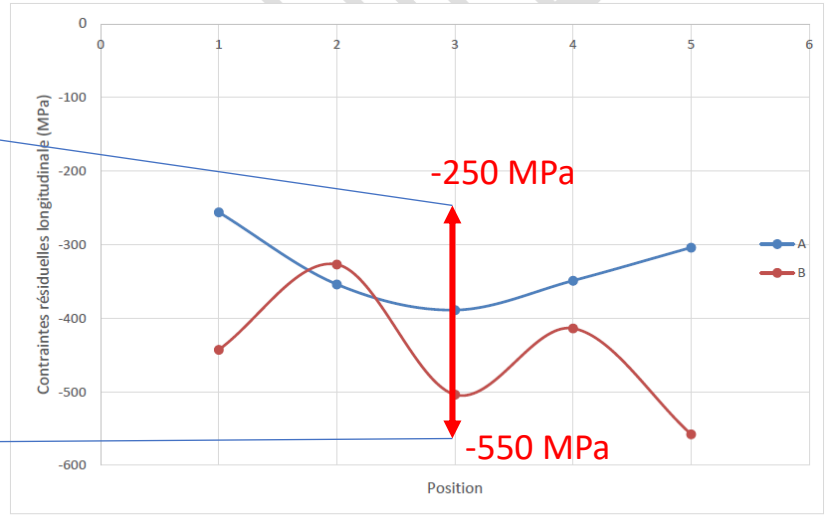


Figure 4: profil des contraintes résiduelles longitudinales

©EDF 2021 - Ce document est la propriété d'EDF - Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation écrite.

Limiter l’apparition de CSC : arasage interne

Procédés d’arasage interne des soudures de pré-assemblages (réalisées en atelier)

Mis en œuvre dès 2023

Procédés d’arasage interne téléopéré des soudures (réalisés sur site)

Première mise en œuvre sur Penly 2 en 2024

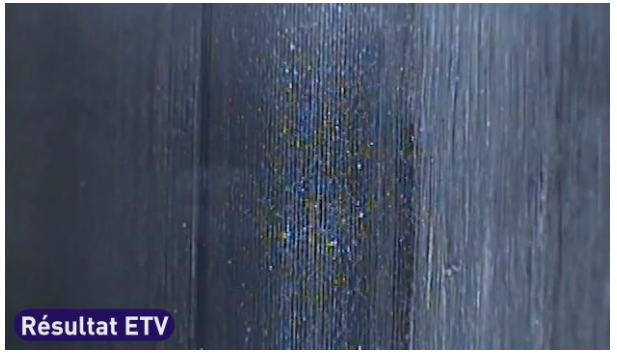
©EDF 2021 - Ce document est la propriété d'EDF - Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation écrite.

Limiter l'apparition de CSC : arasage téléopéré

- **<u>Même objectif :</u>** éliminer le cordon de pénétration de soudure au niveau de la racine dans le but de **prévenir le risque d'amorçage et de propagation d'une fissure de CSC**

- Mise en œuvre en **traitement préventif** des lignes sensibles à la CSC récemment remplacées

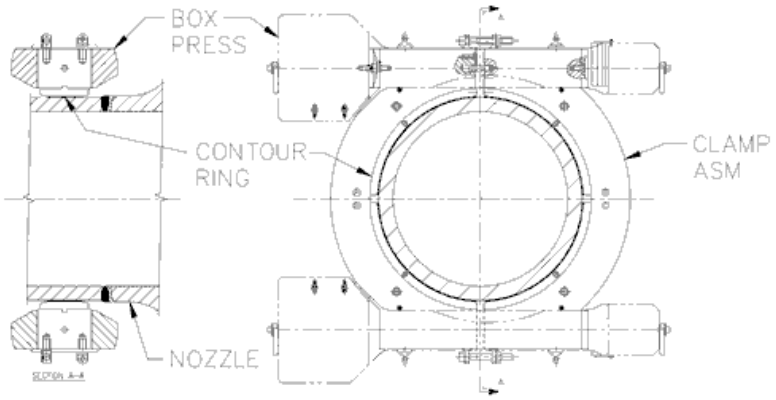
- Procédé mis en œuvre ou en cours de qualification avec différents partenaires industriels (instruction réalisée avec l'ASNR)
- Premiers déploiements à Cattenom, Golfech et Chooz en 2025. Ces opérations seront une première pour un déploiement sur des réacteurs en exploitation.

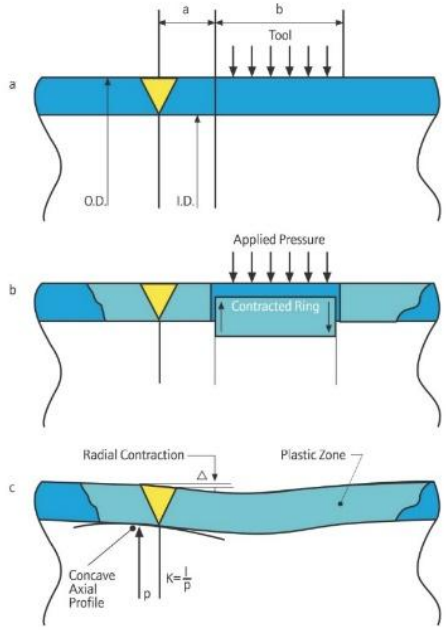


©EDF 2021 - Ce document est la propriété d'EDF - Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation écrite.

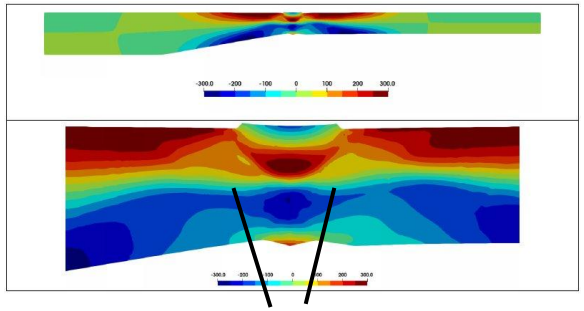
Limiter l'apparition de CSC : procédé MSIP® (Mechanical Stress Improvement Process)

Objectif : créer une **contrainte de compression** à la racine de la soudure pour **prévenir le risque d'amorçage et de propagation d'une fissure de CSC,** en appliquant une charge depuis la surface extérieure de la tuyauterie à l'aide d'un outil positionné sur la circonférence et à côté de la soudure à traiter

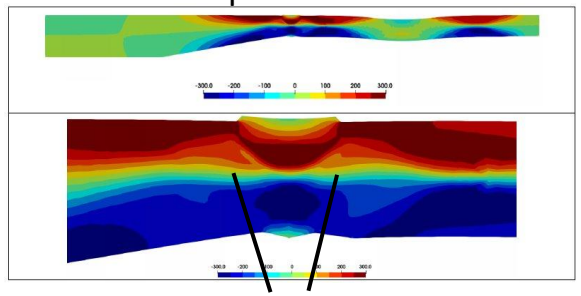




Avant MSIP



Après MSIP

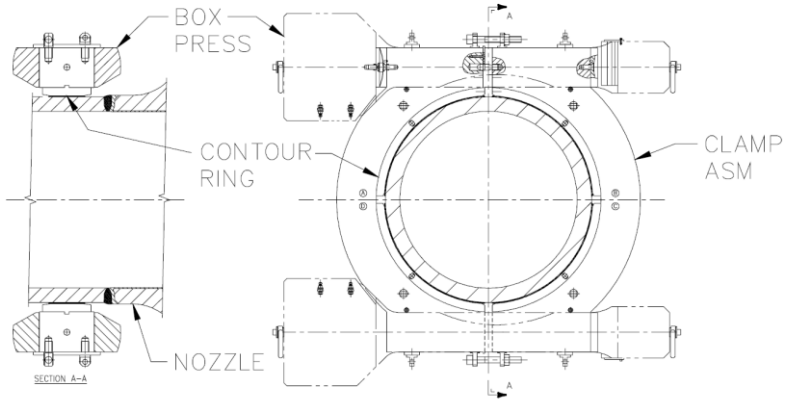


La déformation plastique obtenue génère une **contrainte de compression permanente** sur l'ensemble et autour de la soudure dans la zone délardée en peau interne

- Mis en œuvre par un de nos partenaires industriels à l'international **depuis 1986**
- Démarche de qualification et codification (RCC-M et RSE-M) lancée en 2023 par EDF
- Validation en Groupe Permanent ESPN visée en 2025 et **première mise en œuvre programmée en S2 2025**

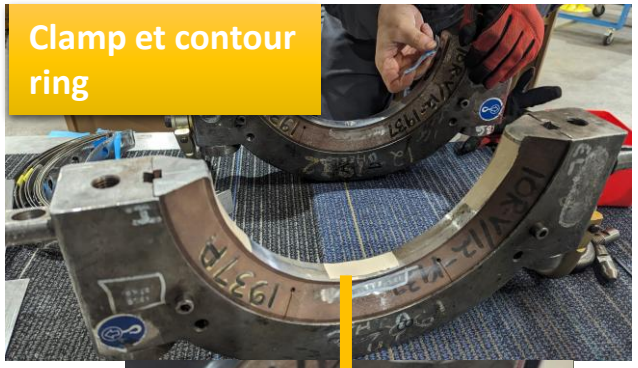
©EDF 2021 - Ce document est la propriété d'EDF - Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation écrite.

Limiter l'apparition de CSC : procédé MSIP® (Mechanical Stress Improvement Process)



Composition d'un outillage MSIP® :

Clamp et contour ring

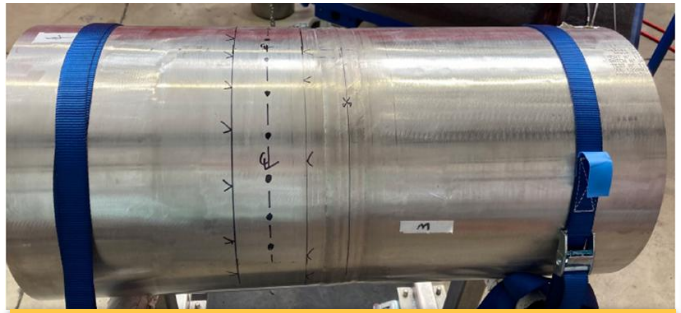


Filler sur contour ring

Box press et clamp

Box Press

Cale

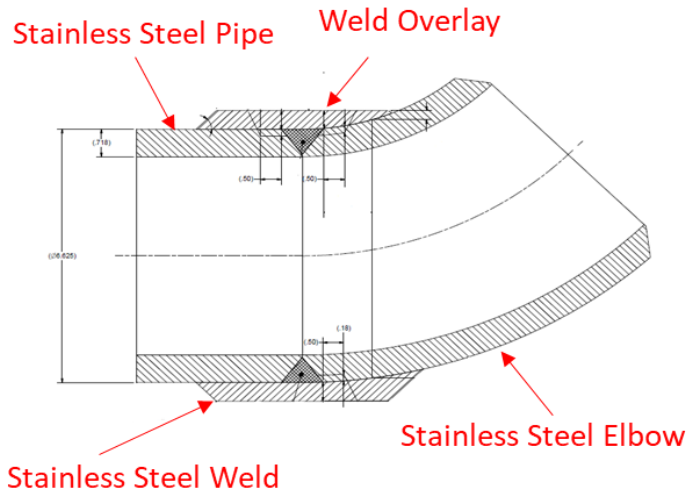


Prise de cote pour positioner les contour ring

Pompe hydraulique

©EDF 2021 - Ce document est la propriété d'EDF - Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation écrite.

Procédés alternatifs de réparation des soudures : le procédé SWOL® (Structural Overlay)



<u>Objectif :</u> créer **une nouvelle barrière structurelle en surépaisseur à la soudure traitée**, permettant également de **mettre sous contrainte de compression la soudure** afin d'e stopper la propagation de la fissure par CSC, et de restaurer les marges en épaisseur vis-à-vis de la tenue mécanique de la ligne.

- Mis en œuvre par un de nos partenaires industriels à l'international **depuis 1982**
- Démarche de qualification lancée en 2024 par EDF
- **Mise en œuvre visée dès 2026**

©EDF 2021 - Ce document est la propriété d'EDF - Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation écrite.

Merci

DIPDE
Division de l'Ingénierie du Parc et De l'Environnement

2025 : 60 ANS SFRP
Société Française de Radioprotection