

### Introduction

La Corrosion sous contrainte induite par les chlorures (CISCC) constitue un risque majeur pour l'intégrité des canistres de stockage à sec du combustible usé (entreposage de longue durée, hors réacteur). Cette problématique, identifiée comme prioritaire par le Pacific Northwest National Laboratory (PNNL) et la Nuclear Regulatory Commission (NRC) nécessite d'éprouver des méthodes de mitigation freinant l'initiation de la fissuration des cuves. Le PNNL étudie une approche mécanique préventive : la projection à froid Cold Spray (CS) [1].

### Objectif de l'étude

Évaluer la capacité d'un dépôt Cold Spray à constituer une barrière mécanique et microstructurale capable de retarder l'initiation de la CISCC sur acier inoxydable 304L, dans la perspective d'une application en conditions réelles.



### III — RÉSULTATS — Synthèse comparative Cold Spray / État initial

Les résultats montrent, dans les conditions expérimentales étudiées par le PNNL, un retard de l'initiation de la CISCC d'un facteur quatre après application d'un dépôt Cold Spray. [1]

Les résultats sont obtenus en conditions accélérées, représentatives mais conservatrices.

#### Inversion des contraintes résiduelles [3,4]:

Transformation de la zone en traction en une zone fortement compressive, stabilisée dans le temps.

→ paramètre essentiel pour réduction de l'amorçage des fissures.

#### 2. Qualité du dépôt [2]:

Le dépôt plus dense, moins poreux, fortement adhérent, et sans zone affectée thermiquement, constituant une barrière mécanique et microstructurale à la pénétration des chlorures.

#### Conséquences en milieu chloruré (CISCC)

Le Cold Spray retarde l'initiation de la CISCC d'un facteur 4 ainsi qu'une réduction de la densité et la profondeur des fissures.

Mesures	Avant Cold Spray	Après Cold Spray
Contraintes résiduelles	+621 MPa (long) / +394 MPa (trans.)	-1100 MPa (compressif)
Porosité	1-3 % (ZAT)	0,07 %
Adhérence	négligeable	> 83 MPa
Zone affectée thermiquement	Oui (ZAT sensible CISCC)	Aucune

Évolution des contraintes résiduelles et de la qualité du dépôt avant et après Cold Spray sur 304L.

Indicateur CISCC	Avant CS	Après CS
Initiation	15-30 jours	> 90-120 jours
Densité de fissures (nombre)	élevée	réduction > 70 %
Profondeur des fissures	80-120 µm	< 10-20 µm ou absence

Évolution des indicateurs de CISCC avant et après Cold Spray sur 304L

### V— verrous réglementaires et données manquantes

Dans le secteur nucléaire, un procédé n'est déployable qu'après démonstration réglementaire de sa répétabilité, de sa stabilité et de sa sûreté à long terme. [3]

#### Déploiement du procédé en milieu nucléaire

#### Normes et qualifications

Qualifications requises selon codes RCC-M et RCC-C,

incluant démonstration de :

- la tenue mécanique du dépôt,
- la stabilité microstructurale,
- l'aptitude à l'emploi nucléaire sur composants réels.

#### Données manquantes

Conditions environnementales réaliste :

- Irradiation
- Microstructure à long terme
  - Fatigue / vieillissement
  - Géométries complexes
- cycles sel-humidité sur géométries réelles

Les travaux du PNNL constituent aujourd'hui une base de réflexion pour les futurs choix en matière de stockage à sec. Les résultats démontrent la faisabilité et la tenue mécanique du traitement, ouvrant la voie à des applications ciblées sur des géométries réelles.

En France, où le stockage à sec est en développement, le Cold Spray pourrait devenir une option de renforcement pertinente pour les exploitants. La technologie est également transférable à d'autres composants nucléaires soumis à la corrosion.

Des validations réglementaires, des essais à plus grande échelle et des données long terme restent nécessaires, mais l'ensemble des résultats place le Cold Spray comme une piste crédible pour améliorer la maîtrise du vieillissement et renforcer la sûreté du stockage à sec du combustible usé.

#### Bibliographie

- [1] NRC. Cold Spray Mitigation Strategies. Report PNNL-30484. Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA; 2021.
- [2] Yeom H, et al. Mechanical properties of thick 304L stainless steel deposits processed by He cold spray. Surface and Coatings Technology. 2015; 277:173-183.
- [3] NRC. PNNL. Cold Spray Coating Qualification. Report NUREG/CR-7228. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC; 2018.

La CISCC : Fissuration corrosive apparaissant lorsque des contraintes mécaniques tirent le matériau pendant que des chlorures attaquent localement la surface.

#### Triade des conditions d'initiation

Contraintes de traction résiduelles

Microstructure altérée (Zone Thermiquement Affectée ou ZAT)

Environnement chloré (sels atmosphériques)

Seuil critique ≈ 0,1-1 mg/cm<sup>2</sup> (sur substrat)

#### Facteurs aggravants

T° > 50

pH bas

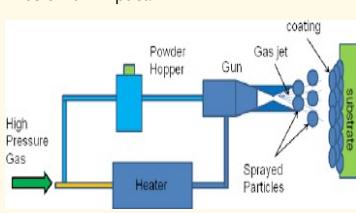
Oxygénation

Humidité intermittente

#### Le Cold Spray

Procédé de projection de particules supersonique à froid à l'aide d'un gaz comprimé (N<sub>2</sub> ou He).

Ancrage par déformation plastique des poudres et du substrat créant un dépôt dense, non fondu, et très adhérent. Pas de fusion à l'impact.



### II — Schéma de synthèse du protocole expérimental comparatif visant à évaluer l'effet du Cold Spray sur la CISCC [1]

conception de l'auteur, assistance IA pour la mise en forme graphique

#### 1 – État initial : substrat soudé



- ▶ Coupons maquette 304L soudés TIG, surface préparée par sablage léger
- ▶ Contraintes résiduelles
- ▶ Zone thermiquement affectée (ZAT)
- ▶ Sensibilité à la CISCC

#### 2 – Plan expérimental comparatif

Comparaison témoin / traité pour isoler l'effet du procédé Cold Spray

- Coupon nu
- Coupon soudé non traité
- Coupon soudé traité (Cold Spray)
- ▶ Comparaison témoin / traité pour isoler l'effet du procédé Cold Spray

#### 3 – Dépôt Cold Spray (procédé à froid)

- Projection de poudre inox 304L (25-44 µm)
- Projection supersonique par jet de gaz (HPCS - High Pressure Cold Spray, N<sub>2</sub>/He)
- ▶ Formation d'un dépôt dense et adhérent sur le substrat soudé



#### 5 – Observations qualitatives

- ▶ Inversion et relaxation des contraintes résiduelles
- ▶ Amélioration de la microstructure du système surface / substrat
- ▶ Retard marqué de l'initiation à la CISCC sur les coupons traités

#### 4 – Caractérisations mécaniques et microstructurales & Essai accéléré en milieu chloruré

##### 4a – Caractérisations

- Mesures des contraintes résiduelles
- Observation de la microstructure du dépôt

##### 4b – Essai accéléré en milieu chloruré

- Dispositif 4 points : bain de 6 M MgCl<sub>2</sub> bouillant (-108 °C)
- ▶ t < 48 h pour initiation rapide de fissures sur plaques sensibilisées



Ces observations constituent la base de l'analyse quantitative des résultats présentés dans la section suivante.

### IV — Comparatif des solutions de mitigation de la CISCC à l'étude

Méthodes	Avantage	Limite
Cold Spray (HPCS)	Compression significative, dépôt dense, adhérence élevée (> 83 MPa) Pas de HAZ, pas de transformation thermique, dépôt épais	Nécessite vitesse critique. Optimisation chimie poudre. Qualification réglementaire à établir
Arc-welding / Fusion repair	Code/qualification existants, équipements répandus	Génére traction autour du cordon, dépôt non dense, faible adhérence mécanique, HAZ par modification microstructurale
Thermal Spray (HVOF, plasma)	Dépôt possible sur surfaces complexes	Souvent tensile dû à solidification, densité/ épaisseur modérées, adhérence moyenne, peut créer HAZ
Shot-peening / Laser peening	Technique éprouvée, parfois complémentaire	Compression superficielle, pas de dépôt réel, pas de barrière dense contre chlorures

→ Ce comparatif montre que le Cold Spray cumule les effets mécaniques recherchés tout en présentant, par sa conception à froid et sa compatibilité avec la télé-opération, un potentiel favorable vis-à-vis des contraintes de radioprotection\*, un potentiel de qualification selon les référentiels nucléaires (ASN/NRC), justifiant les efforts actuels de développement et de qualification [1,3].

\*Compatibilité radioprotection évaluée à ce stade sur la base des caractéristiques intrinsèques du procédé

#### Conclusion

Les travaux du PNNL constituent aujourd'hui une base de réflexion pour les futurs choix en matière de stockage à sec. Les résultats démontrent la faisabilité et la tenue mécanique du traitement, ouvrant la voie à des applications ciblées sur des géométries réelles.

En France, où le stockage à sec est en développement, le Cold Spray pourrait devenir une option de renforcement pertinente pour les exploitants. La technologie est également transférable à d'autres composants nucléaires soumis à la corrosion.

Des validations réglementaires, des essais à plus grande échelle et des données long terme restent nécessaires, mais l'ensemble des résultats place le Cold Spray comme une piste crédible pour améliorer la maîtrise du vieillissement et renforcer la sûreté du stockage à sec du combustible usé.

- [4] ASTM International. ASTM E837-20 — Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method. ASTM International, West Conshohocken, PA; 2020.
- [5] ASTM International. ASTM C633-13 — Standard Test Method for Adhesion or Cohesion Strength of Thermal Spray Coatings. ASTM International, West Conshohocken, PA; 2013.
- [6] ASTM International. ASTM G48-20 — Standard Test Methods for Pitting and Crevice Corrosion Resistance of Stainless Steels and Related Alloys. ASTM International, West Conshohocken, PA; 2020.