

ASSOCIATION DES RETRAITÉS DU GROUPE CEA

Groupe Argumentaire sur les Énergies Nucléaire et Alternatives

LA CORROSION DANS LES INSTALLATIONS NUCLÉAIRES

RÉSUMÉ

La corrosion est un phénomène naturel qui affecte potentiellement tous les matériaux métalliques exposés à des environnements agressifs. Elle induit des dégradations qui affectent les caractéristiques mécaniques et fonctionnels des équipements. Dans le contexte des installations nucléaires, ce phénomène revêt une importance capitale en raison des enjeux de sûreté, de sécurité et de longévité des équipements.

On trouvera dans les installations nucléaires les phénomènes de corrosion présents dans tous les processus industriels classiques. Mais, dans certains cas, des spécificités des installations nucléaires induisent des conditions environnementales ou des sollicitations particulières.

Les installations nucléaires sont soumises à des mécanismes de corrosion variés, souvent combinés. Elle peut compromettre la sûreté des installations nucléaires en provoquant des pertes d'intégrité des barrières de confinement des produits radioactifs qu'elles contiennent et en perturbant les systèmes de sécurité qui doivent fonctionner en cas d'accident.

Les coûts liés à la corrosion des installations nucléaires sont multiformes. Ils concernent la réalisation des opérations de maintenance préventive et corrective, le remplacement ou la réparation des équipements endommagés, la réalisation des opérations de contrôles et d'inspection, les arrêts de production, et, dans le cas particulier des réacteurs nucléaires, les pertes financières liées à la non production d'électricité et aux conséquences sur la stabilité des réseaux électriques, les actions de R&D pour mieux comprendre les phénomènes impliqués, les moyens de les éviter, et qualifier les solutions trouvées.

Lors de la conception des installations nucléaires, le choix des matériaux est primordial pour limiter la corrosion en fonction de l'environnement auquel ils seront soumis. Pour cela, il existe un corpus documentaire abondant pour effectuer ce choix. La deuxième étape de la maîtrise de la corrosion passe par le contrôle de l'environnement auquel les équipements sont soumis.

La détection précoce de la corrosion est nécessaire pour éviter les défaillances. Pour cela des contrôles non destructifs sont mis en œuvre ainsi que des capteurs mesurant les propriétés physicochimiques des fluides et des gaz.

L'expérience acquise lors du fonctionnement des installations nucléaires montre que, la plupart du temps, leur exploitation peut être envisagée au-delà de la durée de fonctionnement définie initialement à leur conception, sous réserve de justifier le maintien d'un niveau de sûreté adéquat. La corrosion est un facteur clé du vieillissement des installations nucléaires. Une bonne maîtrise de ce phénomène permet d'envisager et de justifier la prolongation de cette durée, après validation par l'Autorité de la Sûreté Nucléaire et de la Radioprotection.

1. QU'EST CE QUE LA CORROSION ?

La corrosion est un phénomène naturel qui affecte potentiellement tous les matériaux métalliques exposés à des environnements agressifs. Elle induit des dégradations qui affectent les caractéristiques mécaniques et fonctionnels des équipements. Dans le contexte des installations nucléaires, ce phénomène revêt une importance capitale en raison des enjeux de sûreté, de sécurité et de longévité des équipements.

On trouvera dans les installations nucléaires les phénomènes de corrosion présents dans tous les processus industriels classiques. Mais, dans certains cas, des spécificités des installations nucléaires induisent des conditions environnementales ou des sollicitations particulières.

A titre d'exemple la chimie du primaire dans les REP est fortement conditionnée par des additifs nucléaires (acide borique pour contrôler la réaction nucléaire, lithine pour ajuster le pH, hydrogène pour contrer la radiolyse, etc.). De même, certains matériaux ne sont utilisés que dans les centrales nucléaires : c'est le cas des alliages de zirconium pour le gainage des éléments combustibles, pour lesquels, en plus de la corrosion par l'eau primaire, on peut être amené à prendre en compte une corrosion interne par les produits de fission, dont l'iode.

2. LES DIFFÉRENTS TYPES DE CORROSION RENCONTRÉS

Les installations nucléaires sont soumises à des mécanismes de corrosion variés, souvent combinés. Les principaux types observés sont :

■ La corrosion généralisée

Il s'agit d'une attaque uniforme de la surface du métal, entraînant une perte d'épaisseur progressive. Elle résulte d'une réaction chimique ou électrochimique entre le métal et son environnement (ex. : oxydation de l'acier au contact de l'eau). Elle est aggravée par une température élevée, la présence d'oxygène dissous (qui favorise l'oxydation), et un pH très acide ou très basique. Sa prévention requiert l'utilisation de revêtements protecteurs (peintures, zingage) et le contrôle de la chimie du liquide en contact avec le métal (ajout d'inhibiteurs de corrosion).

■ La corrosion localisée

Il s'agit d'une attaque concentrée sur des zones spécifiques, entraînant une perte de matière. Elle peut s'exprimer de manières variées :

- la corrosion par piqûres (pitting).
- la corrosion par crevasses (dans les interstices).
- la corrosion sélective (désalliation, ex. : dézincification des laitons).

La corrosion localisée est souvent liée aux :

- Hétérogénéités du matériau ou de la pièce (inclusions, défauts de soudure débouchant en surface, discontinuité géométrique en surface).
- Environnements stagnants (accumulation de chlorures ou d'autres espèces agressives dans le milieu en contact avec le métal).
- Gradients de concentration (cellules de corrosion différentielles).

Elle peut être évitée en choisissant des matériaux homogènes (ex. : aciers inoxydables à faible teneur en carbone), en évitant des géométries favorisant les crevasses (conception adaptée), et en nettoyant et passivant les surfaces.

■ La corrosion sous contrainte (CSC)

Il s'agit d'une fissuration due à la combinaison de trois facteurs :

- Un matériau sensible (ex. : acier inoxydable austénitique).
- Un environnement corrosif (ex. : eau chlorurée à haute température).
- Des contraintes mécaniques (contrainte résiduelle ou appliquée).



Exemple de CSC (corrosion sous contrainte) dans un acier inoxydable (Image IRSN)

Elle se manifeste par des fissures intergranulaires ou transgranulaires, souvent fortement branchées et perpendiculaires aux contraintes de traction. Elle est particulièrement redoutée car elle peut conduire à une rupture brutale sans déformation visible. Elle est aggravée par une température supérieure à 50°C, la présence de chlorures, sulfates ou hydroxydes, et les contraintes tensionnelles résiduelles (soudage, formage).

Les paramètres sur lesquels il faut jouer pour l'éviter sont :

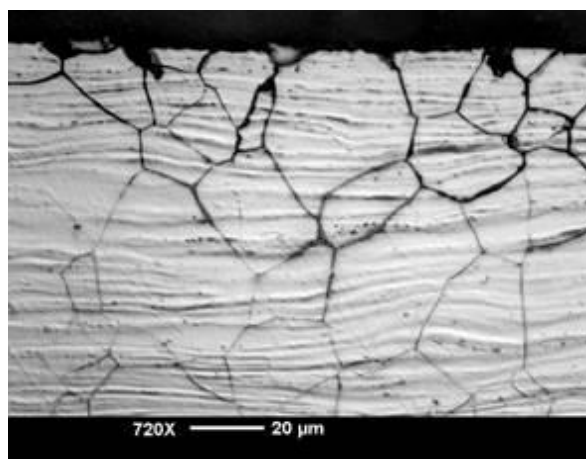
- les traitements thermiques pour réduire les contraintes résiduelles.
- le choix de matériaux résistants à la CSC dans l'environnement considéré (ex. : aciers inoxydables ferritiques, alliages à base de nickel).
- le contrôle strict de la chimie du liquide en contact avec le métal (limitation des halogénures dans l'eau).

La fiche argumentaire **GAENA** "[La fissuration par corrosion sous contrainte dans les REP](#)" [voir Réf. 8] décrit un exemple concret de fissuration par CSC dans les REP et la manière dont il a été traité.

■ La corrosion intragranulaire

Il s'agit d'une attaque préférentielle des joints de grains du métal, entraînant une perte de cohésion du matériau. Cette forme de corrosion est souvent liée à :

- La sensibilisation des aciers inoxydables austénitiques (précipitation de carbures de chrome aux joints de grains, appauvrissant le chrome en solution solide).
- La ségrégation d'impuretés aux joints de grains.



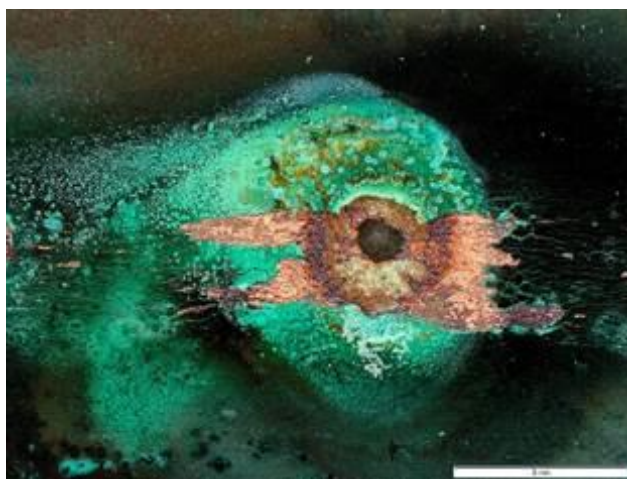
Exemple de corrosion intergranulaire dans une feuille d'acier inoxydable laminée à froid

Elle peut être évitée par un traitement de stabilisation du métal (ex. : addition de niobium ou titane pour piéger le carbone), l'utilisation d'aciers inoxydables à très faible teneur en carbone (ex. : 304L, 316L) et le contrôle des paramètres de soudage (éviter les zones affectées thermiquement).

■ La corrosion par piqûres

Il s'agit d'une attaque préférentielle. Elle correspond à la formation de cavités profondes et localisées à la surface du métal, pouvant perforer une paroi en quelques mois. Elles se forment lorsque :

- Un film passif (ex. : couche d'oxyde sur l'acier inoxydable) est localement détruit.
- Une cellule de corrosion active-passive se crée, avec une anode très petite (la piqûre) et une cathode large (le reste de la surface).
- Le pH local dans la piqûre devient très acide, accélérant la dissolution du métal.



Exemple de corrosion par piqûre de type I sur cuivre (image Kevin Ant 07)

Elle est aggravée par la présence d'halogénures dans le liquide entourant le métal (chlorures, bromures ou iodures), une température élevée et la stagnation du fluide (qui favorise l'accumulation d'espèces agressives).

Elle peut être évitée en choisissant des matériaux résistants (ex. : aciers inoxydables à haute teneur en molybdène comme le 316L), et en contrôlant la qualité du liquide (limitation des halogénures, utilisation d'inhibiteurs de corrosion).

■ La corrosion galvanique

Il s'agit de la corrosion accélérée d'un métal moins noble au sens électrochimique (anode) lorsqu'il est en contact électrique avec un métal plus noble (cathode) dans un électrolyte. Elle suit les principes de la pile électrochimique :

- Le métal anodique (ex. : acier au carbone) se dissout.
- Le métal cathodique (ex. : acier inoxydable) est protégé.
- Le flux d'électrons va de l'anode vers la cathode.

Elle est aggravée quand le rapport surface cathodique/anodique est grand (accélère la corrosion de l'anode), quand l'électrolyte est bon conducteur (eau de mer, solutions acides ou basiques) et quand la température est élevée.

Ses effets peuvent être réduits en évitant les contacts entre métaux dissemblables (utilisation de joints isolants), en choisissant des métaux compatibles, en appliquant des revêtements protecteurs (peintures, zingage), et en utilisant des anodes sacrificielles positionnées à l'interface entre liquide et métal (comme les anodes en zinc ou magnésium pour les bateaux) ... C'est-à-dire utiliser la corrosion galvanique comme mode de protection !

■ La corrosion par érosion

Elle correspond à la dégradation du matériau par enlèvement de matière due à l'action combinée de la corrosion et de l'érosion mécanique (frottement, impact de particules, turbulence). Elle se produit lorsque :

- Un fluide en mouvement rapide (eau, vapeur, gaz) érode le film passif protecteur.

- Des particules solides (sable, oxydes) impactent la surface du métal. Des bulles de vapeur (cavitation) implosent à la surface, créant des microjets destructeurs (cas des pompes primaires des REP).

Elle est aggravée en présence de vitesse élevée du fluide, de particules abrasives (ex. : eaux de refroidissement non filtrées) et de turbulence importante (changements de direction brutaux). Elle peut être évitée en optimisant la conception (éviter les angles vifs, utiliser des courbures progressives), en choisissant des matériaux résistants à l'érosion (ex. : aciers durcis, carbures de tungstène), en filtrant les fluides pour éliminer les particules abrasives et en contrôlant la vitesse du fluide (pour limiter les zones de turbulence).

3. LES ENVIRONNEMENTS PROPICES À LA CORROSION DANS LES INSTALLATIONS NUCLÉAIRES

Dans les réacteurs REP, l'environnement est potentiellement agressif, favorable à la corrosion des matériaux métalliques. En effet, il combine un environnement à haute température (280–320°C pour le circuit primaire des REP) avec éventuellement des gradients thermiques importants, avec des champs de contraintes qui peuvent être complexes, la présence d'espèces chimiques dans l'eau qui peuvent être agressives (halogènes, lithine, oxygène, ...), des discontinuités de surface (cordons de soudure, débardages, bras morts et zones occluses), un environnement bi-phasique (gaz + gouttelettes d'eau) dans certains cas, et de grandes vitesses de circulation des gaz et des liquides.

En dehors de ces réacteurs (REP), d'autres installations nucléaires présentent des environnements également très corrosifs :

- Le sodium ou le plomb pour les réacteurs à neutrons rapides ;
- Les sels fluorés pour les réacteurs à sels fondus ;
- Les très hautes températures pour les réacteurs HTR ;
- Le contact prolongé avec des acides dans les installations de retraitement ;
- Le contact très long (plusieurs dizaines ou milliers d'années) avec des atmosphères humides pour les installations de stockage et d'entreposage des déchets.

4. LES CONSÉQUENCES DE LA CORROSION

■ Les impacts sur la sûreté nucléaire

La corrosion peut compromettre la sûreté des installations nucléaires en provoquant la perte d'intégrité des barrières de confinement des produits radioactifs qu'elles contiennent. Par exemple, pour les réacteurs nucléaires, il peut s'agir de :

- La perte d'étanchéité des gaines de combustible (On parle plutôt de "perforation" dans le cas de corps migrants qui, bloqués près d'un crayon, vibrent et conduisent à une perforation mécanique au droit de cet objet.)
- La fissuration des tuyauteries des circuits primaires et secondaires
- La dégradation du béton armé des enceintes de confinement.

Les systèmes de sécurité (ex. : systèmes d'injection de sécurité, diesel de secours) doivent fonctionner en cas d'accident. Ainsi, la corrosion peut, par exemple, bloquer des vannes (corrosion des actionneurs), endommager des pompes (usure des aubages), dégrader des capteurs (fausses lectures, pannes).

■ Les impacts économiques

Les coûts liés à la corrosion des installations nucléaires sont multiformes. Ils concernent par exemple :

- La réalisation des opérations de maintenance préventive et corrective ;
- Le remplacement ou la réparation des équipements endommagés ;
- La réalisation des opérations de contrôles et d'inspection ;
- Les arrêts de production, et, dans le cas particulier des réacteurs nucléaires, les pertes financières liées à la non production d'électricité et aux conséquences sur la stabilité des réseaux électriques ;
- Les actions de R&D pour mieux comprendre les phénomènes impliqués, les moyens de les éviter, et qualifier les solutions trouvées.

Selon une étude de l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique (AIEA), la corrosion représente 10 à 20 % des coûts totaux de maintenance dans les centrales nucléaires.

■ Les impacts sur la durée de fonctionnement des installations :

L'expérience acquise lors du fonctionnement des installations nucléaires montre que, la plupart du temps, leur exploitation peut être envisagée au-delà de la durée de fonctionnement définie initialement, lors de leur conception, sous réserve de justifier le maintien d'un niveau de sûreté adéquat.

Dans ce cadre, l'impact de la corrosion sur les caractéristiques mécaniques des équipements doit être pris en compte. La corrosion est un facteur clé du vieillissement des installations nucléaires.

Elle impacte directement la durée de fonctionnement des équipements (ex. : cuves, générateurs de vapeur) dans le référentiel de sécurité auquel ils sont soumis.

Une bonne maîtrise de ce phénomène permet d'envisager et de justifier la prolongation de cette durée. On peut citer le cas des réacteurs nucléaires pour lesquels l'Autorité de Sûreté autorise, au cas par cas, des prolongations de la durée de fonctionnement au-delà de la durée envisagée initialement pour ces équipements (40 ans en France pour les REP).

5. LES MÉTHODES DE PRÉVENTION ET DE CONTRÔLE

■ :Le choix des matériaux

Lors de la conception des installations nucléaires, le choix des matériaux est primordial pour limiter la corrosion en fonction de l'environnement auquel ils seront soumis. Pour cela, il existe un corpus documentaire abondant pour effectuer ce choix :

- Retour d'expérience sur des installations similaires ;
- Bibliographie : thèses, conférences, articles dans les revues spécialisées ; Codes et normes.

Les traitements de surface permettent d'améliorer la résistance à la corrosion de certains matériaux. L'exemple le plus flagrant est le revêtement de la cuve des REP, qui est constituée par un acier ferritique choisi pour ses bonnes caractéristiques mécaniques mais sensible à la corrosion par l'eau du circuit primaire, et qui est revêtu par une couche d'acier inoxydable protectrice.

Dans certains cas, il est possible d'envisager, a posteriori, des dépôts de passivation ou des revêtements spécifiques, pour empêcher ou stopper un phénomène de corrosion non envisagé à la conception.

■ Le contrôle des Paramètres Expérimentaux

La deuxième étape de la maîtrise de la corrosion passe par le contrôle de l'environnement auquel les équipements sont soumis. Cet environnement concerne plusieurs aspects :

- Les caractéristiques physico-chimiques des gaz et des liquides : pH, oxygène dissous, polluants (ex : halogénures, sulfates), et des méthodes de maîtrise de ces paramètres (ex : lithine, hydrazine, dégazeurs, filtres, résine échangeuses d'ions, déshumidificateurs, ...) ;
- La maîtrise des champs de contraintes dans les métaux : contraintes résiduelles de soudage et résultant des opérations de montage, contraintes induites par la thermomécanique ;
- La maîtrise des gradients thermiques et de vitesse (vortex, bras morts, ...).

■ La surveillance et l'inspection

La détection précoce de la corrosion est nécessaire pour éviter les défaillances. Plusieurs méthodes sont utilisées :

- des contrôles non destructifs (ultrasons, radiographie, courants de Foucault, magnétoscopie, télévisuel, ressuage, ...) ;
- des capteurs mesurant les propriétés physicochimiques des fluides et des gaz ;
- l'analyse en laboratoire de prélèvements ou d'éprouvettes représentatives des parties d'équipements où un risque de corrosion est envisagé ;
- la réalisation d'essais en laboratoire de corrosion accélérée pour anticiper l'apparition de désordres.

■ La maintenance préventive et corrective

En général, les exploitants d'installations nucléaires mettent en œuvre 2 types de maintenance : maintenance préventive qui suit un plan établi à l'avance, et maintenance corrective qui intervient en cas de constat d'anomalie.

Toutes ces opérations font partie de stratégies de maintenance établies par les exploitants qui peuvent s'appuyer sur le retour d'expérience et l'évaluation des risques réels de corrosion et sont encadrées par des normes internationales ou européennes, telles que celles édictées par l'AIEA, ISO, ASTM et ASME. Cette stratégie, et sa mise en œuvre, sont soumises à l'accord de l'autorité de sûreté nationale.

Les stratégies de gestion du vieillissement, dont celles provoquées par la corrosion, évoluent pour permettre un fonctionnement prolongé des installations. Ainsi, l'approche par risque permet de prioriser les interventions en fonction des risques réels (méthode RBI : Risk-Based Inspection), et la modélisation prédictive permet de prédire l'évolution de la corrosion.

6. CONCLUSIONS

La corrosion dans les installations nucléaires est un défi majeur, avec des enjeux de sûreté, de sécurité, d'économie et de durabilité. Les mécanismes de corrosion sont multiples et complexes, souvent combinés dans les environnements agressifs de ces installations.

Les innovations récentes (nouveaux matériaux, méthodes de surveillance, procédés de fabrication et de contrôle non destructif), couplées avec une meilleure gestion des milieux potentiellement corrosifs dans lesquels baignent les matériaux, ouvrent des perspectives prometteuses pour améliorer la résistance à la corrosion et détecter de manière précoce son apparition de manière à prolonger la durée de fonctionnement des installations nucléaires.

En France, comme dans le reste du monde, la lutte contre la corrosion reste une priorité absolue pour garantir la sûreté et la durabilité des installations nucléaires. Les investissements massifs dans la R&D, la maintenance et la modernisation des installations témoignent de l'importance accordée à ce défi. Enfin, la collaboration internationale (AIEA, OCDE-AEN, projets européens, cycles de conférences internationales telles que celles organisées par le SMIRT, la SFEN et l'ANS) est essentielle pour partager les bonnes pratiques, les retours d'expérience, les innovations et l'accès aux moyens expérimentaux dédiés à l'étude ces phénomènes.

7. RÉFÉRENCES

- [Réf 1] AIEA (Agence Internationale de l'Énergie Atomique). Corrosion of Nuclear Power Plant Components. Rapport technique n°483, 2008.
- [Réf. 2] AIEA. Ageing Management and Maintenance for Nuclear Power Plants. Safety Report Series n°57, 2009.
- [Réf. 3] EDF- Rapport sur la corrosion dans les centrales nucléaires françaises. 2022.
- [Réf. 4] CEA (Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives). Matériaux pour le nucléaire : défis et innovations en 2022.
- [Réf. 5] ASN (Autorité de sûreté nucléaire). Avis sur la gestion du vieillissement des réacteurs REP. 2021.
- [Réf. 6] Framatome. Corrosion in Pressurized Water Reactors: Mechanisms and Mitigation. 2019.
- [Réf.7] OCDE-AEN (Agence pour l'Énergie Nucléaire). Corrosion in Nuclear Power Plants: Current Understanding and Future Challenges. 2018.
- [Réf. 8] Fiche argumentaire GAENA "[La fissuration par corrosion sous contrainte dans les REP](#)"