

# Corrosion et oxydation à haute température : un enjeu industriel majeur

**L'augmentation du rendement énergétique des turbomachines, des centrales énergétiques, des fours et des chaudières tout en assurant la décarbonation est un enjeu majeur pour les industriels des secteurs de l'aéronautique, des transports, de l'énergie et de la métallurgie. Pour atteindre cet objectif, les composants de ces installations exposés à des gaz de combustions sont soumis à des sollicitations mécaniques et des températures de plus en plus élevées, entraînant un besoin en matériaux plus réfractaires.**

## INTRODUCTION

Les sollicitations mécaniques à haute température peuvent entraîner une dégradation des matériaux par fatigue et fluage, et/ou par oxydation et corrosion à haute température. La résistance de ces alliages face à cet environnement conditionne fortement leurs propriétés mécaniques et par conséquent la durée de vie des pièces.

Si le choix des matériaux réfractaires (superalliages, aciers réfractaires et céramiques) est une étape primordiale pour garantir la longévité des systèmes mécaniques, encore faut-il pouvoir les tester dans des conditions proches des conditions réelles de fonctionnement. Aujourd'hui, il existe de nombreux moyens d'essai permettant de tester les alliages dans des conditions d'oxydation sous air à haute température, mais très peu de moyens permettent de réaliser des essais de corrosion à haute température sous atmosphère « complexe » (corrosion par un mélange de gaz, des dépôts corrosifs ou des sels fondus).

Ainsi, l'IRT-M2P a fait le choix stratégique d'investir dans une plateforme d'essais versatile, permettant de réaliser ces essais en milieu complexe tout en sollicitant mécaniquement, et de pouvoir répondre aux besoins des industriels concernés par les problématiques de durabilité des matériaux à haute température.

## 1. LE PROJET COMEHT

### a) Objectifs et motivations :

Lancés en 2022, les travaux du projet COMEHT s'inscrivent dans une démarche collaborative rassemblant des partenaires industriels (Safran Tech, CEA, Saint-Gobain, Veolia, Aperam) et académiques (Centre des Matériaux — Mines Paris, Institut Jean Lamour, CIRIMAT — Université de Toulouse, UTC Compiègne, ESME Lyon). Le projet est structuré sur une durée de 5 ans avec un budget d'environ 3,2M€.

L'objectif central de COMEHT est de développer une plateforme d'essais expérimentaux originale voire « inédite » et versatile dédiée à l'étude de la corrosion à haute température, capable de reproduire des conditions de service représentatives (températures, atmosphères, cycles thermiques, présence de dépôts corrosifs) et de générer une base de données expérimentale robuste pour

la modélisation et la caractérisation de la durabilité des matériaux. Cette plateforme doit permettre de réaliser des essais à température constante ou en cyclage thermique, combinant des sources de combustion variées (gaz, kérosène, hydrogène dans un avenir proche) et un banc de fatigue-corrosion à chaud, offrant la possibilité de tester simultanément un grand nombre d'échantillons ou de pièces industrielles de grande dimension.

Ce travail s'appuie sur une étude de faisabilité antérieure (CorrHT) qui a permis de définir les conditions expérimentales pertinentes, les contraintes techniques et les modalités de mise en œuvre de cette plateforme innovante. Cette étude a fait l'objet d'un article dans la revue Techniques de l'Ingénieur<sup>[1]</sup>.

### b) Enjeux scientifiques et industriels

La corrosion à haute température associe des réactions chimiques complexes entre matériaux métalliques ou céramiques et des atmosphères corrosives riches en composés agressifs (gaz soufrés, sels fondus, vapeur d'eau). Elle se manifeste par le dépôt de phases corrosives à faible point de fusion, la dissolution des couches d'oxydes protecteurs, ainsi que la formation de phases fragiles. Les phénomènes observés varient selon :

- Le milieu environnemental (gaz de combustion, atmosphères soufrées, vapeur d'eau)
- La composition chimique des dépôts (sels chlorures, nitrates, sulfates) ;
- La température d'utilisation (typiquement entre 500°C et 900°C pour l'aéronautique).

Ces complexités rendent indispensable une approche expérimentale intégrée couplée à des outils de caractérisation avancée (microscopie électronique, diffraction des rayons X, thermogravimétrie), et des méthodes de modélisation des cinétiques de corrosion et des interactions thermomécaniques.

### c) Applications industrielles ciblées

Les applications ciblées par COMEHT sont variées et stratégiques :

- Turbines aéronautiques : corrosion liée à des dépôts de sulfates de sodium en atmosphère chaude et aux gaz oxydants rencontrés dans ce type d'environnement (SO<sub>2</sub>/SO<sub>3</sub>).

**Pauline Vilasi,**  
docteure en sciences  
des matériaux, IRTM2P.

- Incinérateurs de déchets : corrosion de pièces métalliques exposées à des gaz de combustion corrosifs et à des milieux condensés types sels ou/et cendres.
- Milieux sels fondus (chlorures, nitrates) : conditions pertinentes pour les centrales solaires à concentration et certains réacteurs nucléaires.
- Réduction directe des minerais de fer
- Oxydation intergranulaire et couplage mécanique : influence sur les propriétés structurales

**d) Plateforme expérimentale et méthodologie**

Le cœur du projet COMEHT est la plateforme expérimentale construite à Uckange (Moselle), qui englobe les fonctionnalités suivantes :

- Banc brûleur modulable utilisant différents combustibles (gaz naturel, kérosène) ;
- Possibilité de réaliser des essais de cyclage thermique permettant des tests en conditions répétées ;
- Possibilité de coupler des sollicitations mécaniques aux phénomènes de corrosion ;
- Tests sur pièces industrielles de grande taille (le volume de la chambre de corrosion est d'environ 30cm<sup>3</sup>) ;
- Génération de données fiables pour alimenter des modèles prédictifs.

Ce dispositif (représenté schématiquement sur la Figure 1) est complété par des programmes de caractérisation multi-échelle (analyse microstructurale, chimique et mécanique) et des campagnes d'essais couvrant les environnements définis ci-dessus.

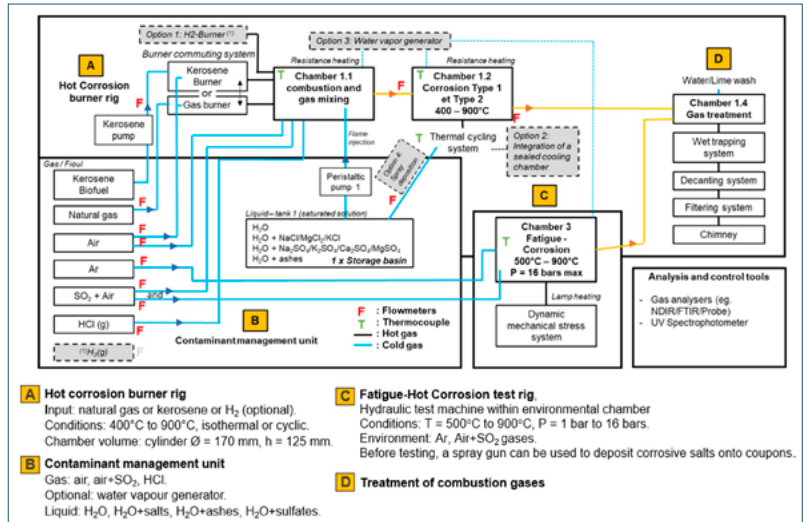
**e) Premiers résultats et avancées**

À ce stade (infrastructures en déploiement jusqu'en 2026), les résultats tangibles concernent :

- La mise en place structurée de la plateforme d'essais pour corrosion haute température.
- La création d'un consortium industriel-académique solide impliquant des acteurs majeurs de l'aéronautique, de l'énergie et de la métallurgie.
- L'identification et la priorisation des 5 axes d'étude couvrant les environnements critiques (gaz, dépôts corrosifs, sels fondus, oxydation intergranulaire, couplage mécanique/corrosion).
- Une base de données expérimentale en cours de constitution la plus exhaustive et actualisée qui permettra, à terme, de modéliser la durabilité des matériaux dans des conditions extrêmes.

Par ailleurs, ce projet sert de fondation au programme « corrosion HT », déployé au sein de l'IRT-M2P. Un deuxième projet est d'ailleurs en cours : REVEHT (REVEtements Haute Température), et vise à développer des revêtements protecteurs innovants pour prolonger la durée de vie des composants soumis à corrosion à haute température, en exploitant la plateforme d'essais développée dans COMEHT.

En parallèle de la construction de la plateforme « COMEHT », les travaux menés dans le cadre du projet ont donné lieu à des résultats prometteurs, notamment : i) deux thèses sont en cours de finalisation, soutenues lors du premier trimestre 2026,



ii) la structuration et l'architecture de la base de données sont finalisée et testées actuellement par les partenaires, iii) l'étude concernant la corrosion en milieu UVED (incinération des déchets et valorisation énergétique) a permis de tester des matériaux base-nickel plutôt employés par les partenaires de l'industrie aéronautique et enfin iv) l'étude de la corrosion en milieu nitrate fondue (Solar SALT), détaillée au chapitre suivant, a permis de caractériser les aciers inoxydables élaborés par le partenaire APERAM.

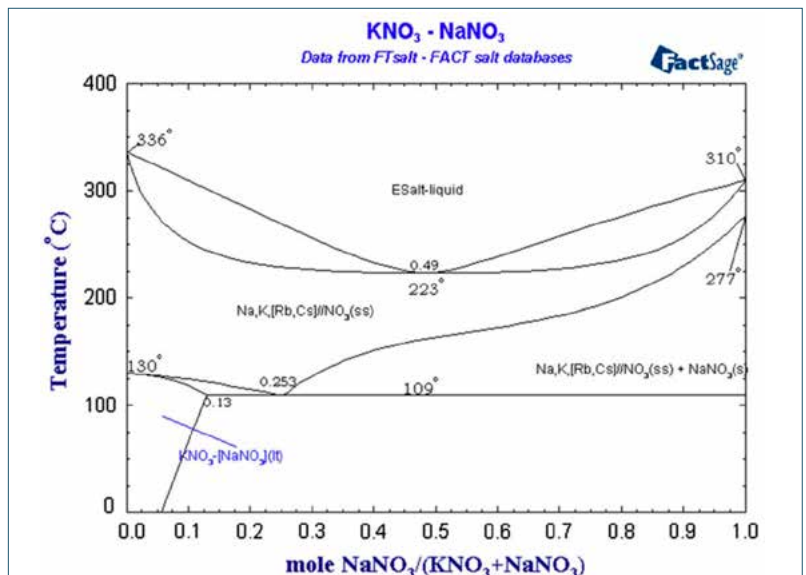
**2. ÉTUDE DU COMPORTEMENT DE NUANCES D'ACIERS INOXYDABLES AUSTÉNITIQUES EN MILIEU NITRATES FONDUS À 600°C, RÉSULTATS ISSUS DU PROJET COMEHT**

**a) Contexte et objectif de l'étude**

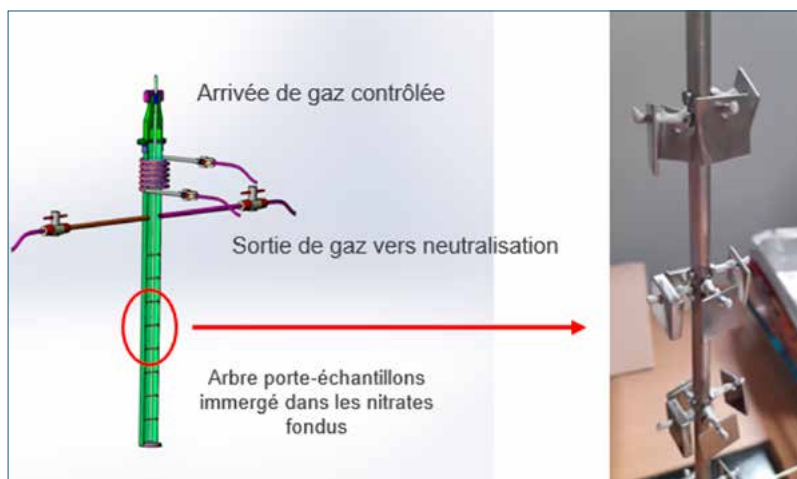
Dans le cadre du projet COMEHT, une étude spécifique a été consacrée au comportement d'aciers inoxydables austénitiques en milieux nitrates fondus, représentatifs des conditions rencontrées dans les centrales solaires thermodynamiques (CSP).

Le mélange étudié correspond au Solar Salt, composé de 60 % massique NaNO<sub>3</sub> — 40 % massique KNO<sub>3</sub>, de température eutectique 223°C (Figure 2).

**Figure 1.** Représentation schématique de la plateforme COMEHT et de ses spécifications **Figure 2.** Diagramme binaire NaNO<sub>3</sub>/KNO<sub>3</sub>



**Figure 2.** Diagramme binaire NaNO<sub>3</sub>/KNO<sub>3</sub>



**Figure 3.**  
Réacteur étanche utilisé pour les campagnes 2 et 3, introduit dans un four vertical

Ce sel est utilisé comme matériau de stockage thermique par chaleur latente. L'augmentation des températures d'exploitation vers 600 °C vise à améliorer les rendements thermodynamiques, mais soulève des questions sur la durabilité des matériaux métalliques. L'objectif de l'étude était d'établir un classement de performance de cinq nuances d'aciers inoxydables fournies par Aperam en milieu Solar Salt à 600 °C.

### b) Protocole expérimental

#### Nuances étudiées:

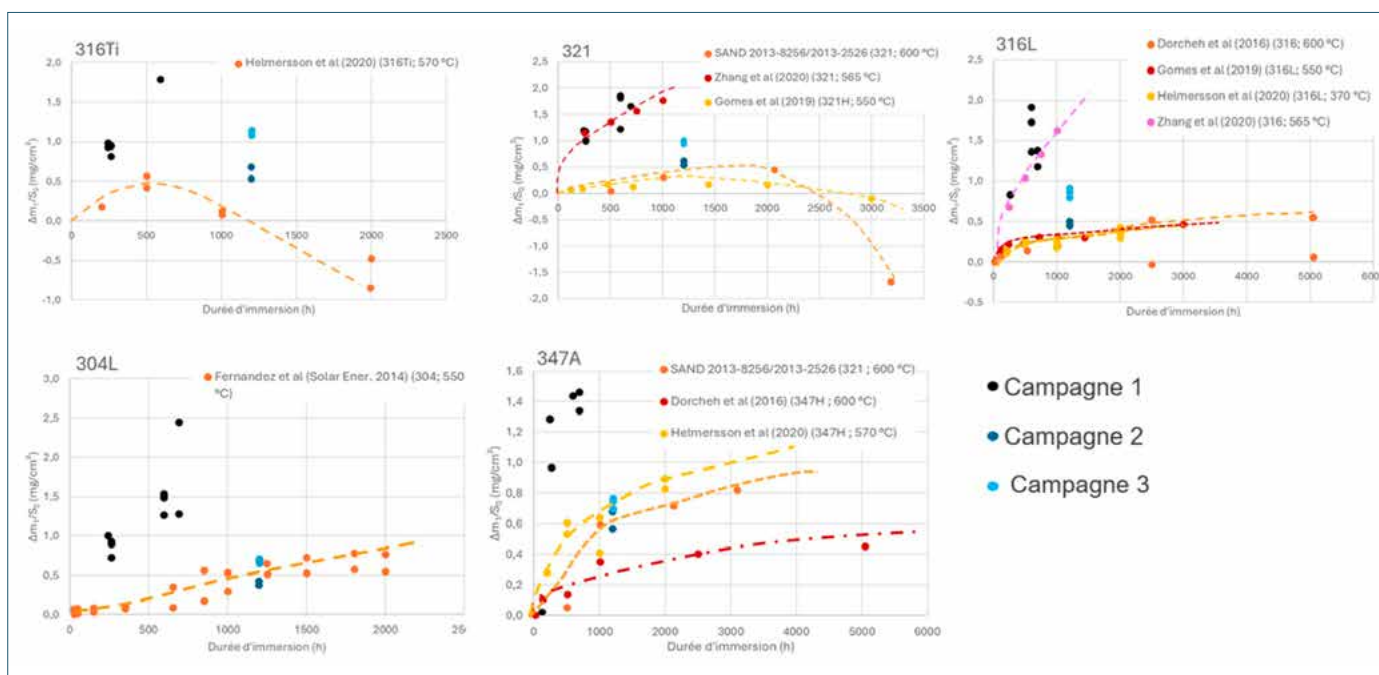
Cinq aciers inoxydables austénitiques ont été évalués. Il s'agit des matériaux 304L, 316L, 316Ti, 321 et 347.

#### Conditions d'essais

Deux types de campagnes ont été menées à 600 °C

- Campagne 1, correspondant plutôt à de courtes durées (243 h, 262 h, 595 h, 693 h), réalisée en réacteurs individuels en silice, fermés de manière semi-étanche.
- Campagnes 2 et 3, correspondant aux essais longue durée (1200 h), réalisées dans un réacteur inox étanche aluminisé et préoxydé, avec circulation d'un flux d'air

**Figure 4.**  
Analyse des prises de masse après corrosion, comparées avec les données de la littérature.



synthétique (0,2 Lh<sup>-1</sup>). Ce protocole a permis de tester simultanément une vingtaine d'échantillons, suspendus à un arbre immergé dans le milieu fondu à l'intérieur du réacteur (Figure 3).

Les techniques de caractérisation utilisées:

- Mesures gravimétriques ( $\Delta m/S$ ),
- Analyses par microscopie électronique à balayage MEB/EDS,
- Diffraction des rayons X (DRX)

### c) Résultats gravimétriques et reproductibilité

Les essais en réacteur étanche ont montré une bonne reproductibilité des résultats, convergente avec les données de la littérature (Figure 4). Un point clé ressort nettement: les échantillons testés en réacteur fermé sont moins corrodés que ceux testés en conditions semi-étanches, d'après les valeurs de  $\Delta m_1/s_0$  calculées, Où  $\Delta m_1/s = (m_1 - m_0)/S_0$  Avec  $m_1$  correspond à la masse du coupon corrodé (après lavage H<sub>2</sub>O + éthanol) (mg),  $m_0$  à la masse initiale du coupon sain avant essai (mg),  $S_0$  surface initiale du coupon avant essai (cm<sup>2</sup>)

Ce résultat met en évidence l'importance cruciale du contrôle de l'atmosphère dans l'évaluation de la corrosion par les nitrates fondus. La comparaison avec la littérature reste délicate en raison de la méconnaissance des protocoles expérimentaux mis en œuvre, ils sont souvent insuffisamment détaillés et de plus, quand les informations sont accessibles, il apparaît que les atmosphères sont variables.

Globalement, les aciers inoxydables austénitiques présentent globalement de bonnes performances à la corrosion par le milieu Solar Salt à 600 °C, avec des rapports  $\Delta m_1/s_0$  comparables à ceux d'alliages base nickel ou mixtes Ni-Fe-Cr et bien plus faibles que pour des aciers standards<sup>[2,3,4]</sup>.

**d) Classement des nuances**

À partir des données de la campagne longue durée (1200 h), les vitesses de corrosion ont été estimées selon une hypothèse linéaire conservatrice, hypothèse forte en l'occurrence mais largement utilisée dans les travaux de la littérature.

Le classement obtenu est le suivant :

$$316L \approx 304L \approx 347 > 321 > 316Ti$$

Les différences restent modérées, confirmant la bonne tenue globale des nuances austénitiques dans ces conditions. Toutefois, la disparité des cinétiques mesurées suggère une influence probable mais sensible de la microstructure et des éléments d'alliage secondaires : cet aspect reste à documenter par un approfondissement ultérieur des caractérisations microstructurales.

**e) Microstructures et nature des produits de corrosion**

Les observations MEB (Figure 5 et Figure 6) montrent que les couches formées après 1200 h ne sont pas compactes. Elles apparaissent plus ou moins poreuses et fissurées, ce qui explique la dispersion observée dans les valeurs de  $\Delta m/S$ . Les analyses DRX et EDS révèlent :

- La présence de  $NaFeO_2$ ,
- La présence de  $Na_2CrO_4$ ,
- L'absence de  $NaCrO_2$ .

**f) Interprétation thermodynamique et mécanismes**

Afin d'expliquer les faciès de corrosion observés, on s'est appuyé sur les données thermodynamiques représentées ici (Figure 7) par un diagramme de phases :

$$E(V) = f(pO_2), \text{ où } pO_2 = -\log(aO_2)$$

En surface,  $NaFeO_2$  a été identifié. Or, cette phase ne peut exister que si l'oxo-basinité du milieu, représentée  $pO_2$ , est inférieure à 9,5.

De même,  $Cr_2O_3$  a été identifié et non  $NaCrO_2$ . Il faut alors supposer que la concentration  $NaCrO_2$  est inférieure à  $10^{-6} \text{ mol.L}^{-1}$ , valeur « seuil » admise comme indicateur de la mise en place d'un processus de corrosion notable. Dans le cadre de cette hypothèse, l'équilibre entre  $Cr_2O_3(\text{solide})$  et  $NaCrO_2 (10^{-6} \text{ mol.L}^{-1})$  s'établit à une valeur de  $pO_2 = 17$ .

Il y a donc une évolution de l'oxo-basinité dans l'épaisseur de la couche de produits de corrosion qui se traduit par l'existence d'un gradient d'ions  $O^{2-}$  au sein de cette couche de corrosion.

Le système fonctionne alors comme une pile électrochimique locale, entre l'alliage et la surface des produits de corrosion où l'alliage correspond au site anodique et la surface au site cathodique. Cette pile est responsable de la poursuite dans le temps de la corrosion électrochimique et justifie la stratification des produits (Figure 8).

**Importance du contrôle atmosphérique**

L'étude souligne la nécessité de tamponner le milieu, comme il est montré dans les travaux de *Bonk et al* :

- En  $O_2$  (réaction  $NO_3^- \leftrightarrow NO_2^- + \frac{1}{2} O_2$ ),

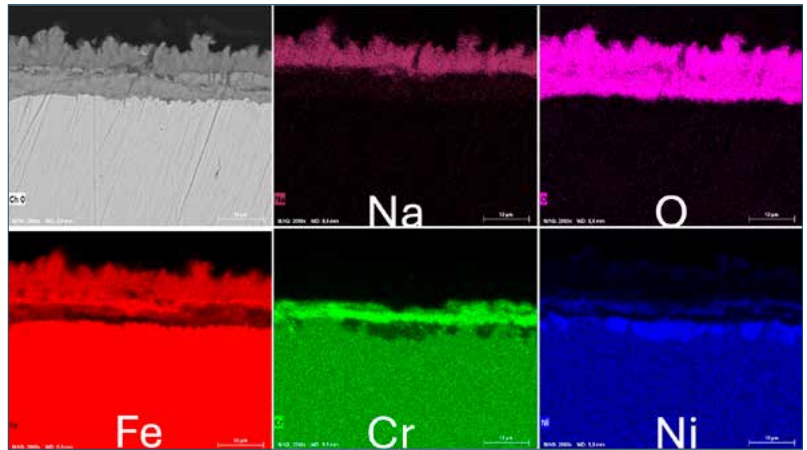


Figure 5. Cartographies EDS du 304L corrodé après 1200h d'immersion dans les nitrates

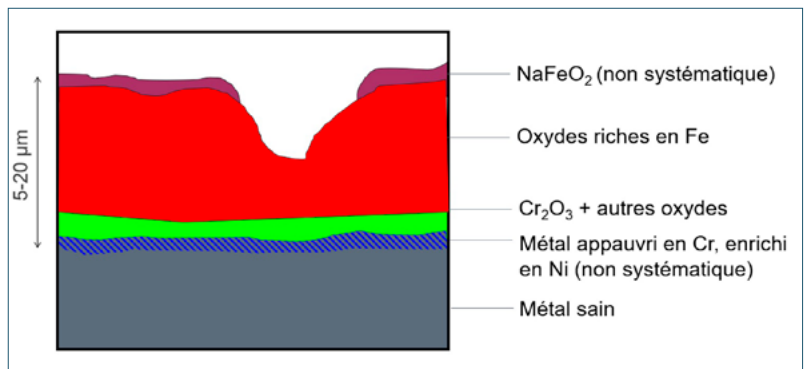


Figure 6. Faciès de corrosion des aciers inoxydables corrodés par les nitrates

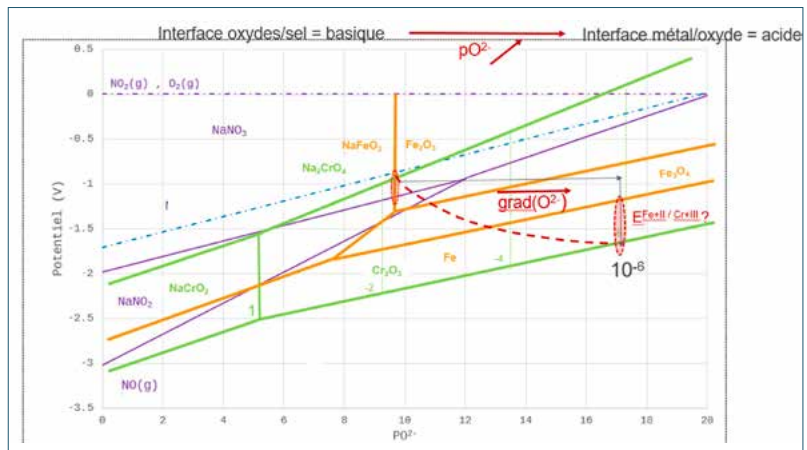


Figure 7. Diagramme tracé à l'aide du logiciel HSC à 600°C ou  $pO_2 = -\log(aO_2)$

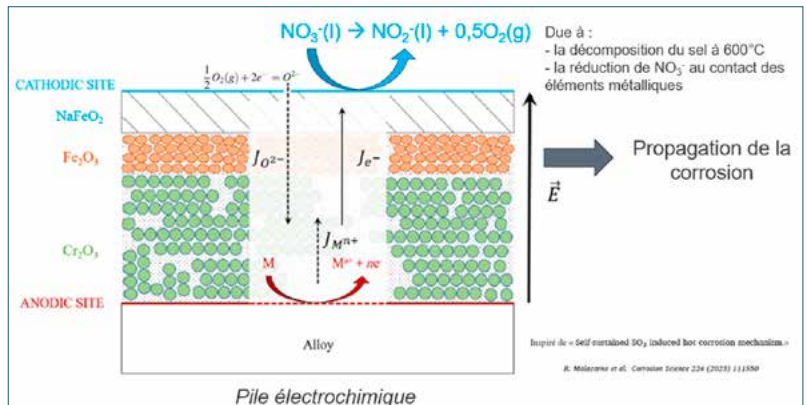


Figure 8. Mécanisme électrochimique induit au travers de la couche des produits de corrosion d'un acier austénitique corrodé par les nitrates fondus

- Mais également en  $O^{2-}$  via un contrôle de l'équilibre impliquant NO et  $NO_2$

La maîtrise de ces paramètres conditionne la reproductibilité des essais et la pertinence des comparaisons inter-laboratoires.

### g) Conclusion des essais en milieu nitrates fondus

Les travaux menés dans le cadre du projet COMEHT montrent qu'à 600°C en Solar Salt, les aciers inoxydables austénitiques présentent une bonne résistance globale à la corrosion, sous réserve d'un contrôle rigoureux de l'atmosphère d'essai

Les différences observées entre nuances restent limitées mais mettent en évidence l'influence des éléments d'alliage et des mécanismes redox dans le bain fondu.

La compréhension et le contrôle fins des équilibres  $NO_3^-/NO_2^-$  et de l'activité en  $O^{2-}$  apparaissent déterminantes pour l'établissement de protocoles normalisés et la prédiction de la durabilité à long terme.

### 3. PERSPECTIVES ET IMPACT

Le projet COMEHT ouvre de nouvelles perspectives pour la conception de matériaux et de revêtements plus durables, ainsi que pour la normalisation des essais de corrosion haute température à l'échelle industrielle. Grâce à sa plateforme d'essais versatile, il permet :

- De fournir des données de référence pour l'industrie aéronautique, énergétique et métallurgique ;
- De renforcer la capacité de prédiction des modèles de corrosion et de durabilité ;

- D'accélérer l'adoption de solutions matériaux performantes dans les environnements extrêmes ;
- De soutenir la transition vers des technologies plus efficaces et décarbonées.

### 4. CONCLUSION

En plaçant la corrosion haute température au centre d'une approche expérimentale intégrée, le projet COMEHT porté par l'IRT-M2P constitue une avancée significative dans la compréhension et la maîtrise de phénomènes complexes qui limitent les performances des matériaux structuraux. L'effort collaboratif entre industriels et académiques, la dimension innovante de la plateforme d'essais, et l'articulation avec des projets complémentaires (comme REVEHT) positionnent COMEHT comme un référentiel méthodologique et technologique pour la corrosion à haute température dans les applications industrielles critiques. De plus, l'aspect versatile de la plateforme permet d'envisager la réalisation d'études à plus haute température, notamment pour la corrosion par les CMAS ( $CaO-MgO-Al_2O_3-SiO_2$ ) et via l'emploi d'un réacteur en céramique et non plus en alliage métallique, ou encore pouvoir réaliser des essais de corrosion par la vapeur d'eau. ■

1. Sanviemvongsak *et al*, Corrosion à chaud des métaux et des alliages – État de l'art des moyens d'essai, mars 2022, Techniques de l'Ingénieur
2. Sandia Report SAND2000-8727 (2001)
3. Fernandez *et al*, Solar Energy 109 (2014)
4. Dorcheh, Solar Energy Materials and Solar Cells 144 (2016)
5. Bonk *et al*, Corrosion Science 227 (2024) 111700