

FATIGUE CORROSION DANS LE SENS TRAVERS COURT DE TOLES D'ALUMINIUM 2024-T351 PRESENTANT DES DEFAUTS DE CORROSION LOCALISEE

Nathalie PAUZE

David DELAFOSSE
Dôme TANGUY

Jérôme DELFOSSE
Dominique SCHUSTER

Fatigue Corrosion :

phénomène d'endommagement des matériaux résultant de l'**action conjointe**

- d'un **environnement corrosif**
- d'une **sollicitation mécanique cyclique.**

Accident de l'Aloha Airlines en 1988,
sur un Boeing 737



Contexte industriel :

- gestion et maintenance des **flottes vieillissantes,**
- **remplacement des protections** à base de chrome pour des raisons environnementales,
- utilisation de **nouvelles générations d'alliages.**



Objectif :

⇒ **Caractériser l'endommagement en FC :**

- morphologies,
- cinétiques (synergie),
- mécanismes.

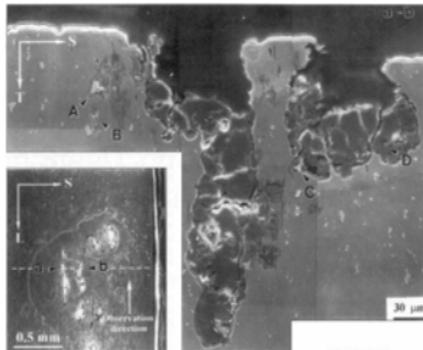
⇒ Introduire une notion de **tolérance à l'endommagement**



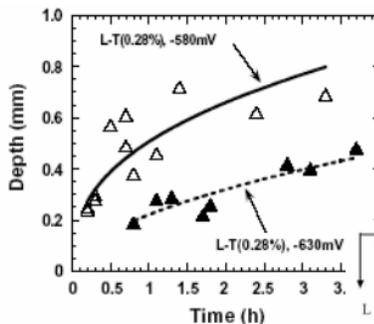
Revue bibliographique :

⇒ en corrosion (alliage 2xxx)

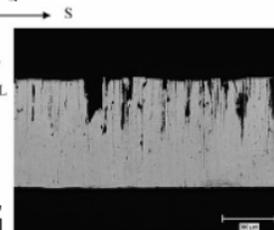
- études de la **piqûration** : défauts de corrosion étendus [Liao, 1998].
- études de la **corrosion intergranulaire** dans des milieux **très oxydants** :
 - à potentiel libre en solution EXCO [Robinson, 1998]
 - à potentiel imposé sous bullage d'oxygène dans NaCl 1 M [Liu, 2004].



[C.-M. Liao et al. , *Corrosion* 54 (1998)]



[X. Liu et al. ,
Corrosion Science 46 (2004)]

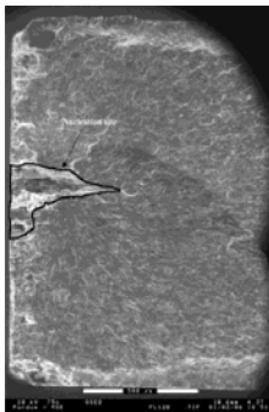


Revue bibliographique :

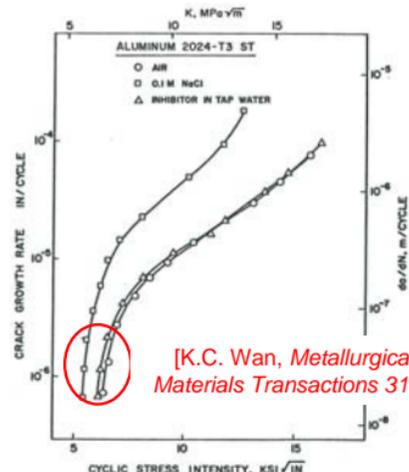
⇒ en fatigue corrosion (alliage 2xxx)

- études sur la propagation **en fatigue à l'air à partir des piqûres sévères**, ce qui suppose implicitement l'absence de couplage entre corrosion et fatigue.
- études sur la propagation **en fatigue corrosion limitées au régime de Paris**.

Amorçage contrôlé par la corrosion



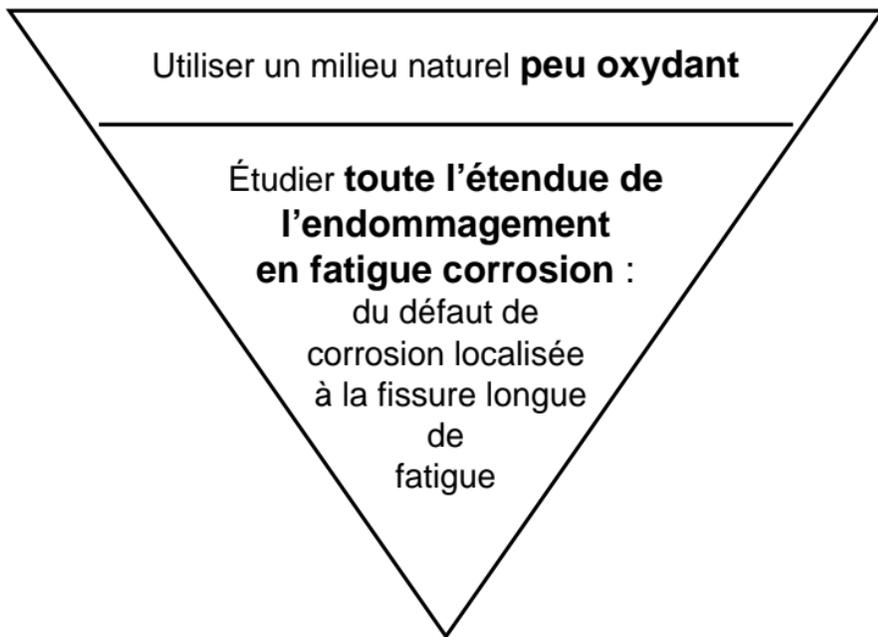
Propagation contrôlée par la fatigue



[K.C. Wan, *Metallurgical and Materials Transactions* 31 (2000)]

[K.M. Gruenberg et al., *International Journal of Fatigue* 26 (2004)]

[M. Khobaib et al., *Corrosion* 36 (1981)]



Mettre en évidence :

- les **couplages** milieu/sollicitation
- des **changements de cinétiques**
- les différentes **transitions** entre les endommagements



Démarche expérimentale : - **NaCl 0.5 M**, pH=7, à potentiel libre, naturellement aérée
- **3 types d'essais**

⇒ Essais
d'immersion



⇒ Essais de **FC** et de **fatigue à l'air**



⇒ Essais de **traction lente**



DU DEFAUT DE CORROSION LOCALISEE A LA FISSURE DE FATIGUE (CORROSION)...

1 – Matériau

2 – Sensibilité de l'alliage à la corrosion localisée

3 – Corrosion Sous Contrainte (CSC)

4 – Fatigue Corrosion

- ⇒ FC intergranulaire
- ⇒ FC transgranulaire
- ⇒ Transitions

Conclusions - Perspectives



DU DEFAUT DE CORROSION LOCALISEE A LA FISSURE DE FATIGUE (CORROSION)...

1 – Matériau

- ⇒ Texture morphologique
- ⇒ Microstructure

2 – Sensibilité de l'alliage à la corrosion localisée

3 – Corrosion Sous Contrainte (CSC)

4 – Fatigue Corrosion

Conclusions - Perspectives

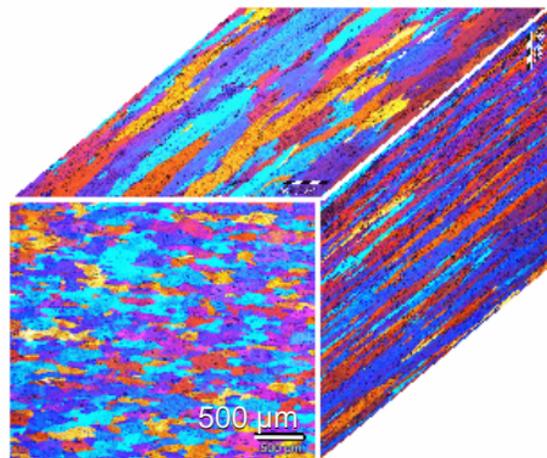
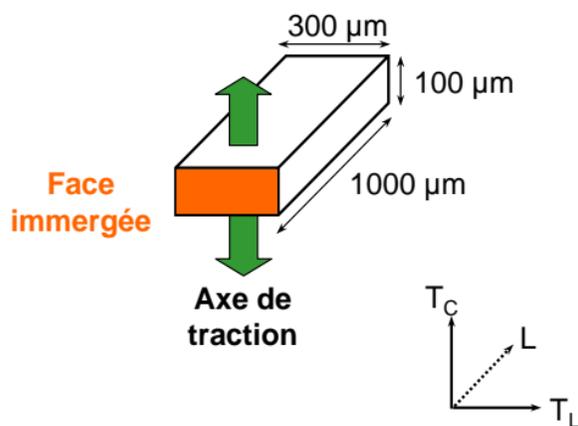


Alliage 2024

- alliage d'aluminium de la famille des 2xxx

Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Ti	Zn
4.464	1.436	0.602	0.129	0.057	0.0297	0.021

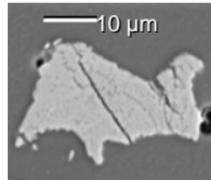
- sous forme d'une tôle laminée **épaisse** (50 mm)



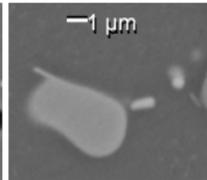
Microstructure :

- alliage à **durcissement structural**
- traité thermiquement (**T351**) : **sous revenu**
- précipitation intragranulaire :

Intermétalliques grossiers

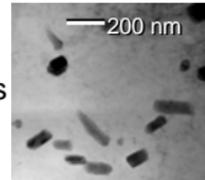


Al-Cu-Mn-Fe

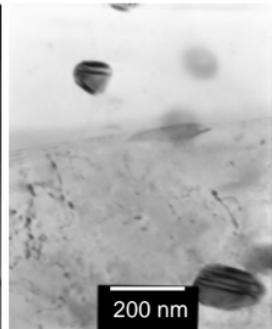
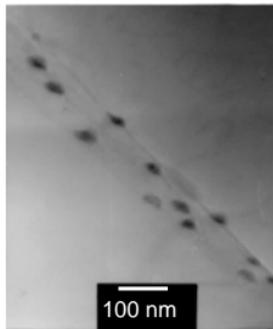
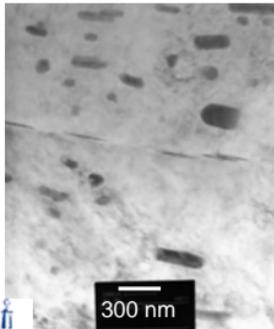


Al-Cu-Mg

Dispersoïdes

Al₂₀Cu₂Mn₃

- **précipitation intergranulaire :**



- ⇒ peu de précipités
- ⇒ précipités de la matrice
- ⇒ précipités **riches en cuivre** dont la forme et la distribution est hétérogène le long des joints de grains

DU DEFAUT DE CORROSION LOCALISEE A LA FISSURE DE FATIGUE (CORROSION)...

1 – Matériau

2 – Sensibilité de l'alliage à la corrosion localisée

- Piqûration

- Corrosion Intergranulaire, CI

 - ⇒ Morphologie

 - ⇒ Cinétique

 - ⇒ Mécanisme

3 – Corrosion Sous Contrainte (CSC)

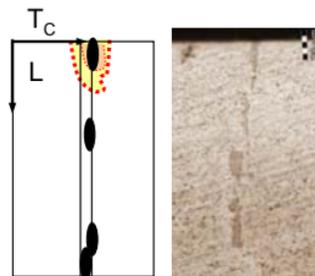
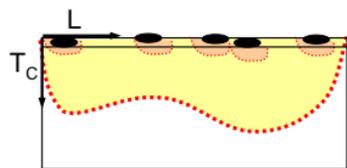
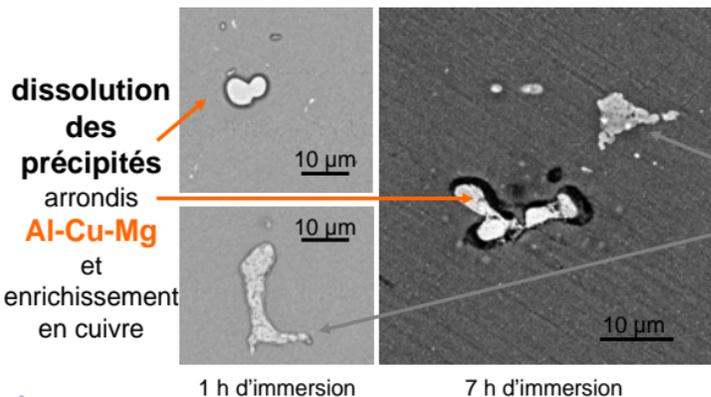
4 – Fatigue Corrosion (FC)

Conclusions - Perspectives



Piqûration :

- amorçage sur les **particules intermétalliques grossières**
- propagation fonction de la **distribution des particules** en volume
- dans le **sens long, pas de piqûres sévères**
- l'intensité de la dissolution est réduite dès le déchaussement du premier précipité laissant un **cratère participant peu à l'endommagement**



Corrosion Intergranulaire, CI

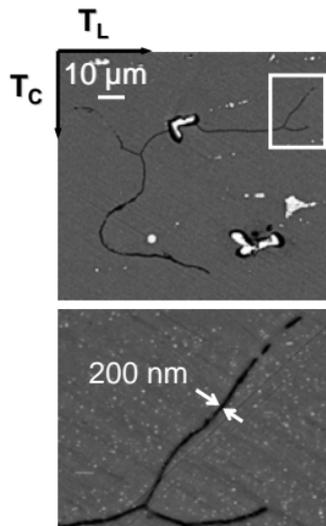
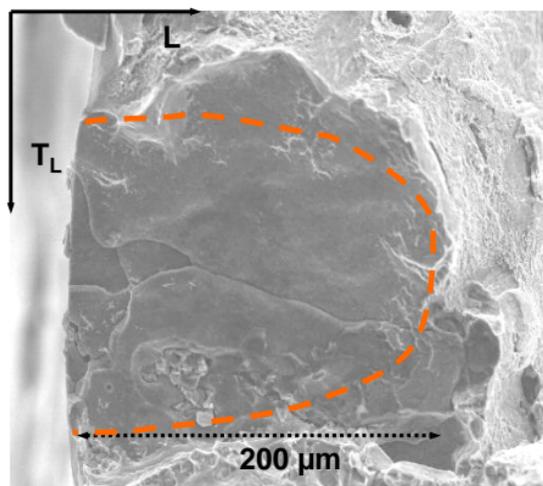
Morphologie

Cinétique

Mécanisme



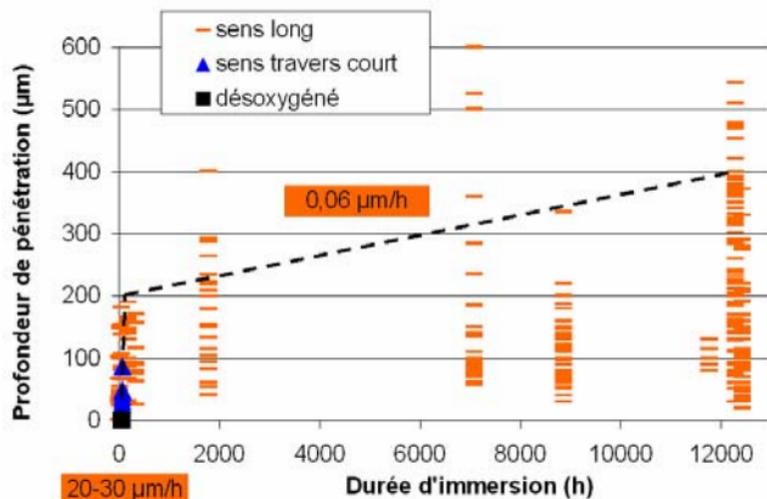
(essais d'immersion dans NaCl 0.5 M, pH = 7, à potentiel libre, sous aération naturelle)



⇒ Il se forme en 7h d'immersion :

- un défaut de CI **semi-elliptique**,
- de **150 à 250 μm de profondeur**
- sur **quelques centaines de nanomètres d'épaisseur.**

Coupes transverses d'échantillons massifs (347 défauts mesurés)

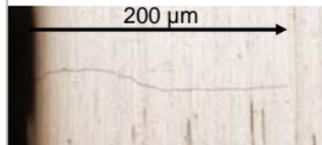


Plusieurs paramètres peuvent expliquer le ralentissement :

- des paramètres **microstructuraux**
- des paramètres **électrochimiques** (désoxygénation)

- ⇒ La CI est **visible dès 1 h d'immersion**.
- ⇒ La CI est très **rapide : 30 µm/h dans les 7 premières heures** d'immersion.
- ⇒ Puis, la CI **ralentit fortement : 0,06 µm/h**.
- ⇒ Aucune trace de CI en milieu désoxygéné.

Évolution de la CI en 5 étapes :

**1 - Sillon profond très fin :**

200 μm de profondeur sur quelques dizaines de nanomètres d'épaisseur

**2 - Épaississement du sillon :**

200 μm de profondeur sur quelques micromètres d'épaisseur

**3 - Épaississement hétérogène du sillon :**

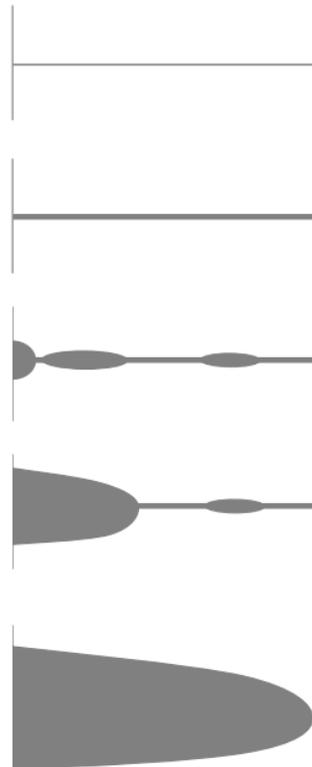
Piqûres, corrosion intragranulaire

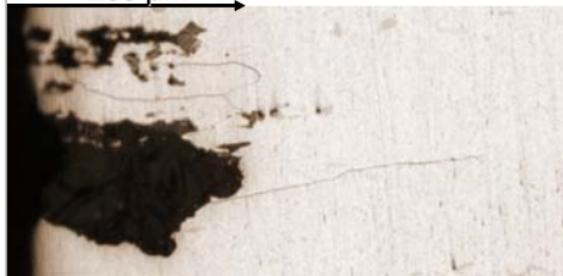
**4 - Développement des piqûtes et de la corrosion intragranulaire :**

Formation d'une piqûte sévère débouchante inférieure à 200 μm de profondeur

**5 - Développement de la piqûte sévère :**

La piqûte ou corrosion intragranulaire s'étend sur toute la profondeur du sillon initial



200 μm 

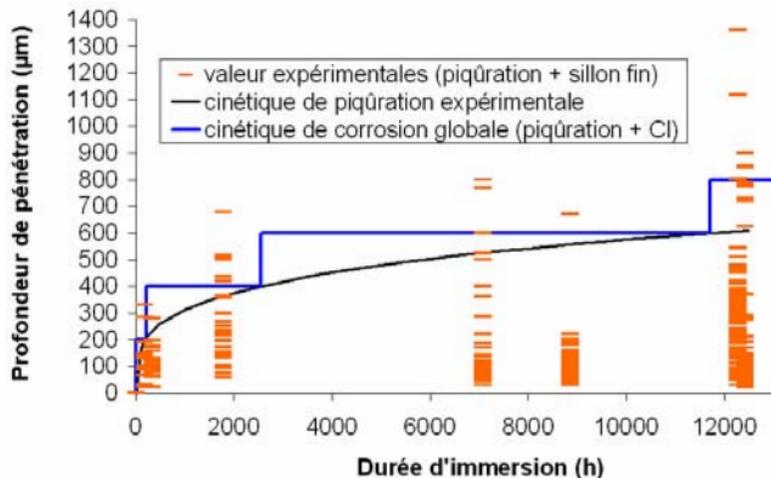
1bis - Apparition d'un nouveau sillon fin et profond en avant de la piqûre sévère.

Cinétique complète de la corrosion localisée :

Corrosion intergranulaire

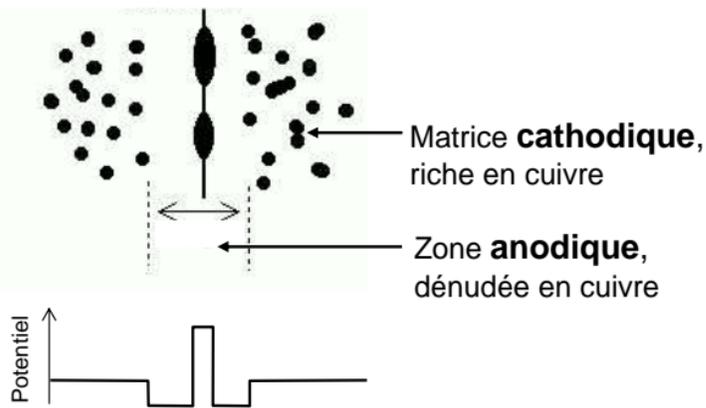
+

Piqûre

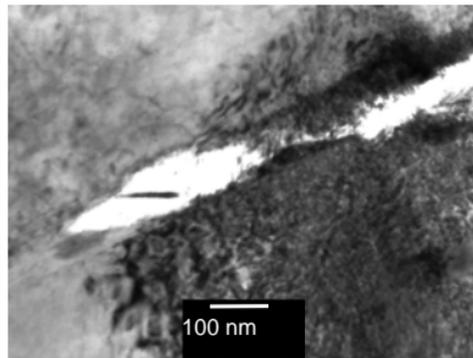


Mécanisme :

le modèle classique de CI suppose la présence d'une **zone dénudée en cuivre** qui va se dissoudre.



CI :



Joint de grains
après 30 s dans NaCl 0.5 M

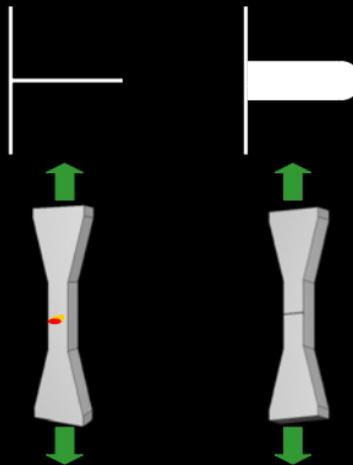
⇒ la dissolution se
produit préférentiellement
autour du précipité

Résumé

- ⇒ Il se forme un défaut semi-elliptique de **200 μm de profondeur en 7h d'immersion** dans NaCl 0.5 M, pH=7, naturellement aéré, à potentiel libre.
- ⇒ **Deux régimes** de propagation : **20/30 $\mu\text{m}/\text{h}$** dans les 7 premières heures
0.06 $\mu\text{m}/\text{h}$.
- ⇒ L'alliage 2024 T351 est sensible à la **CI**, à cause d'une **zone appauvrie en cuivre** le long des joints de grain.

Corrosion intergranulaire

Corrosion sous contrainte



DU DEFAUT DE CORROSION LOCALISEE A LA FISSURE DE FATIGUE (CORROSION)...

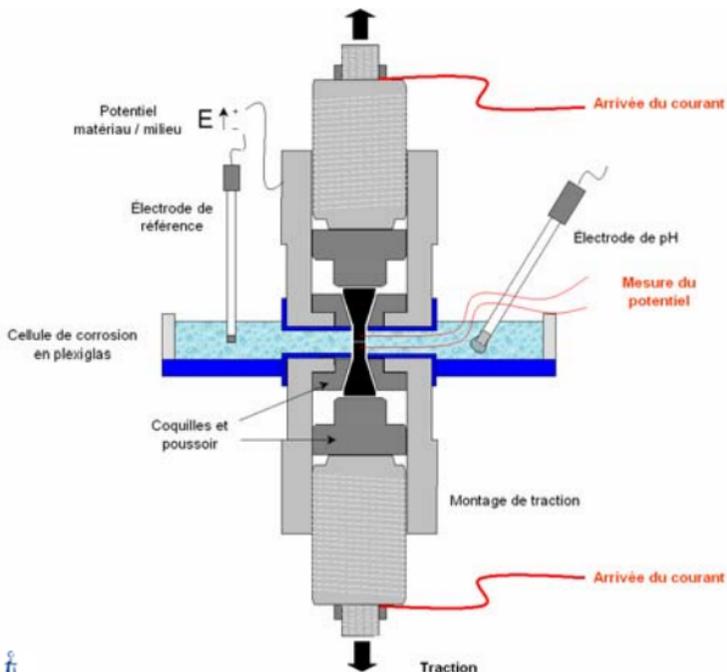
- 1 – Matériau
- 2 – Sensibilité de l'alliage à la corrosion localisée
- 3 – Corrosion Sous Contrainte (CSC)
 - ⇒ Morphologie
 - ⇒ Cinétique
 - ⇒ Mécanisme
- 4 – Fatigue Corrosion (FC)

Conclusions - Perspectives

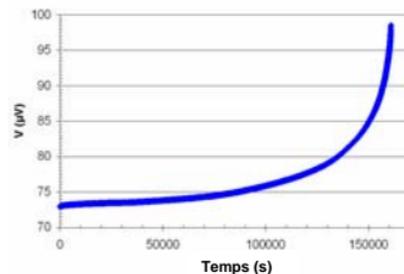


Essais de **traction lente** à 5.10^{-8} s^{-1} sur des éprouvettes à section carrée
(dans NaCl 0.5 M, pH=7, à potentiel libre)

Montage de traction lente



Suivi de fissure

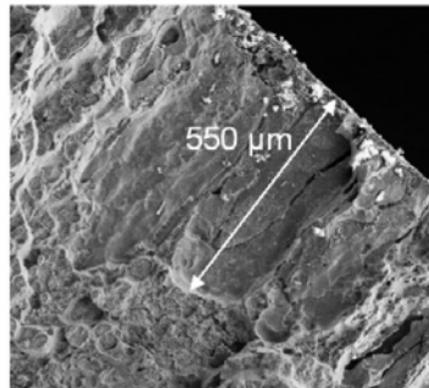
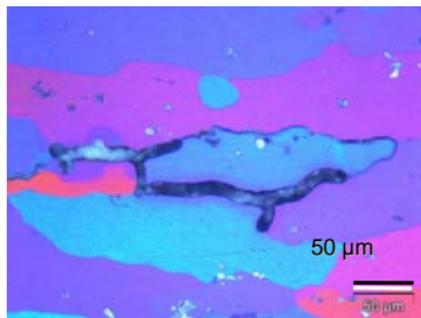


$$a = \frac{2W}{\pi} \cos^{-1} \left[\frac{\cosh\left(\frac{\pi y}{2W}\right)}{\cosh\left[\frac{V}{V_0} \cos^{-1}\left(\frac{\cosh\left(\frac{\pi y}{2W}\right)}{\cos\left(\frac{\pi a_0}{2W}\right)}\right)\right]}\right]$$

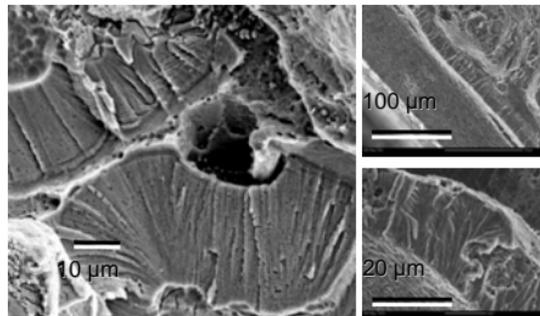
- a : longueur de la fissure
- a_0 : longueur de la fissure initiale
- W : largeur de l'éprouvette
- V : différence de potentiel
- V_0 : différence de potentiel initiale
- Y : demi-distance entre les deux électrodes

Nature de la fissuration :

- Fissures **intergranulaires**



- Quelques zones **transgranulaires**

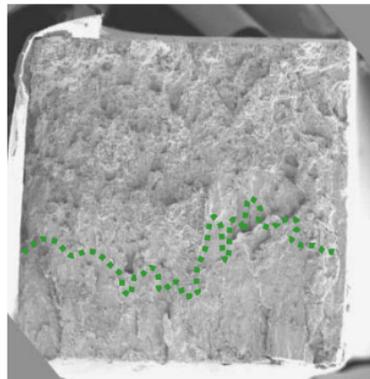
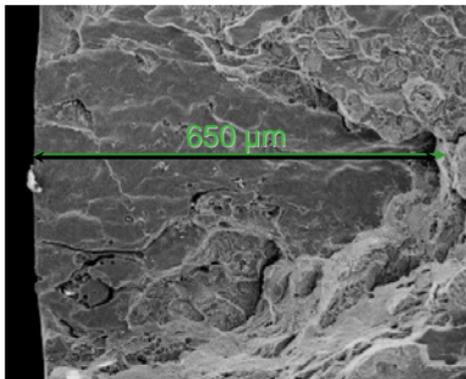


Morphologie

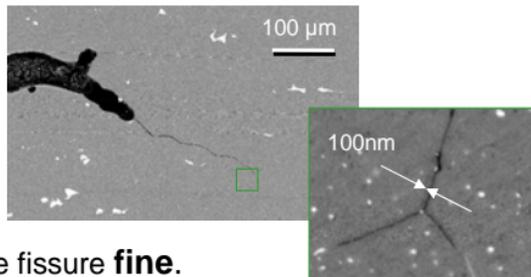
Cinétique

Mécanisme





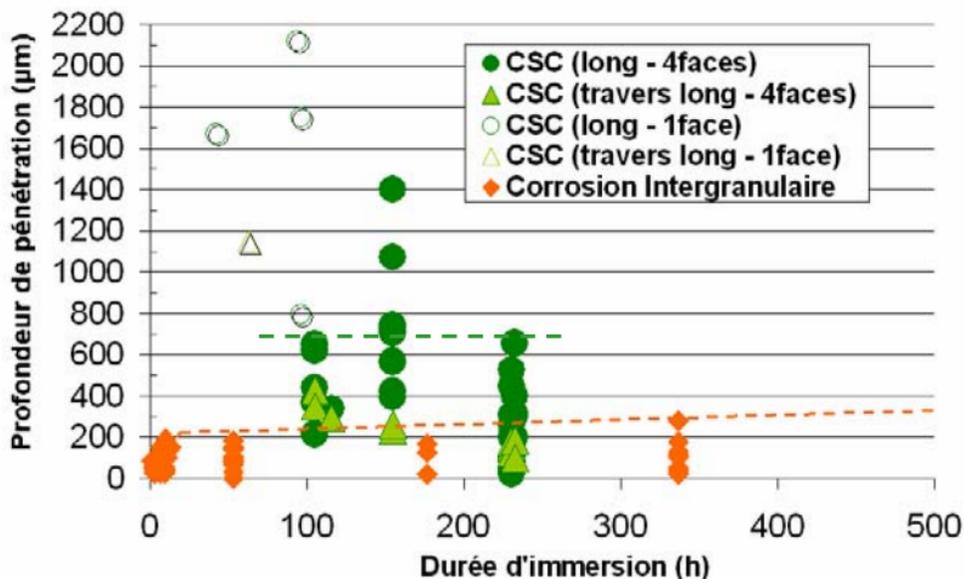
- ⇒ Morphologie similaire à celle observée sans sollicitation mécanique :
forme semi-elliptique pouvant coalescée sur toute la largeur de l'éprouvette.



- ⇒ En coupe, deux parties :
fissure **émoussée** prolongée par une fissure **fine**.

Essais de traction lente à $5 \cdot 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ sur des éprouvettes à section carrée
(dans NaCl 0.5 M, pH=7, à potentiel libre)

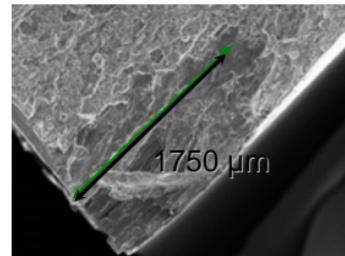
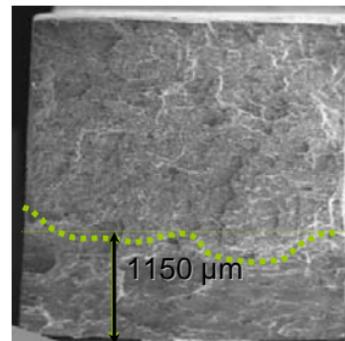
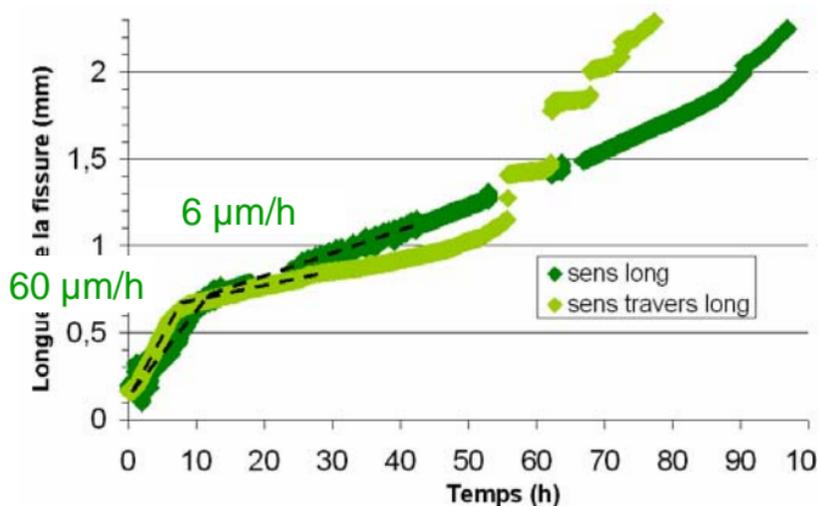
37 défauts isolés
5 défauts suite à
une entaille



⇒ La CI atteint des profondeurs beaucoup plus élevée qu'en l'absence de contrainte :

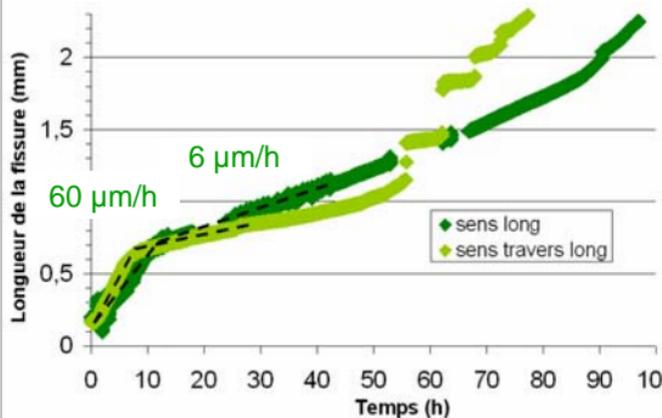
- les défauts **isolés** semi-elliptiques atteignent **600 µm de profondeur**,
- les défauts à **front rectiligne** peuvent atteindre **2 mm**.

Traction lente sur éprouvettes **micro-entallées**
instrumentées avec la méthode de **suivi électrique**

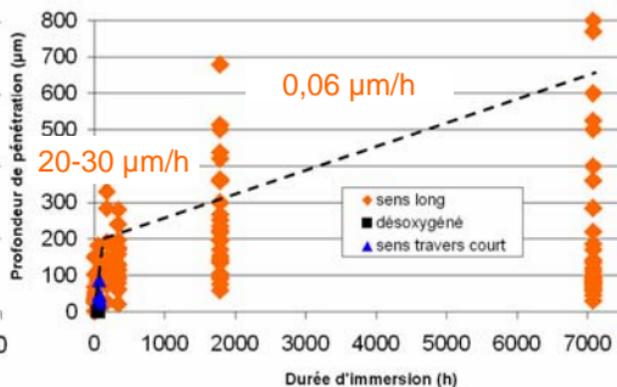


⇒ **Deux régimes** de propagation

Synergie :



Essais de **traction lente** à $5 \cdot 10^{-8} \text{ s}^{-1}$
sur éprouvettes micro-entallées
instrumentés avec la méthode de
suivi électrique

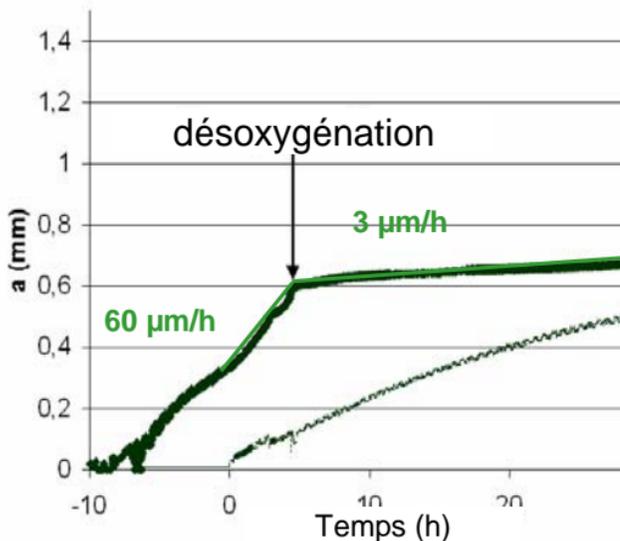


Coupes transverses d'échantillons massifs
après **immersion**
dans la solution corrosive

⇒ La contrainte accélère la CI :

- d'un **facteur 1 à 3** dans la partie initiale **rapide**
- d'**1 à 2 ordres de grandeur** dans le régime **lent** de propagation.

Désoxygénation en cours d'essais



⇒ La désoxygénation induit un **ralentissement de la propagation du même ordre de grandeur** que celui observé en conditions d'aération naturelle.

Résumé

⇒ Deux régimes de propagation

⇒ **Transition** corrélée avec une **désoxygénation** en fond de fissure :
changement de réaction cathodique.

⇒ **Effet synergique** corrosion/déformation plastique :

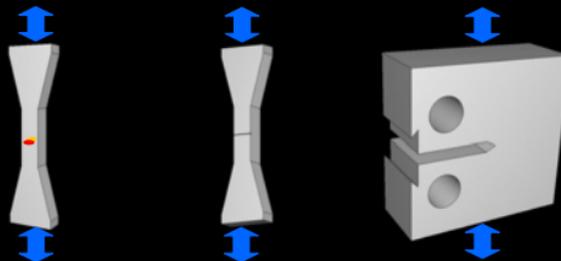
- dans le régime rapide (en milieu oxygéné), **facteur entre 1 et 3 sur la vitesse**,
- augmentation de la profondeur de transition : de **200 à 600 μm** ,
- dans le régime lent (en milieu confiné), la vitesse est **1 à 2 ordres de grandeur** plus élevée et la fissuration reste intergranulaire fine.

⇒ **Mécanisme de dissolution anodique assistée par la contrainte.**

Corrosion intergranulaire

Corrosion sous contrainte

Fatigue corrosion



DU DEFAUT DE CORROSION LOCALISEE A LA FISSURE DE FATIGUE (CORROSION)...

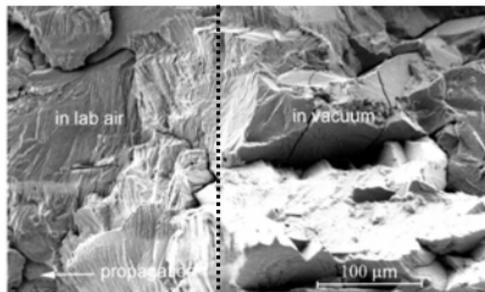
- 1 – Matériau
- 2 – Sensibilité de l'alliage à la corrosion localisée
- 3 – Corrosion Sous Contrainte (CSC)
- 4 – Fatigue Corrosion (FC) :
 - **FC Intergranulaire**
 - ⇒ Morphologie
 - ⇒ Cinétique
 - ⇒ Mécanisme
 - **FC transgranulaire**
 - ⇒ Morphologie
 - ⇒ Cinétique
 - **Transition inter/trans**
 - **Transition trans/inter**

Conclusions - Perspectives



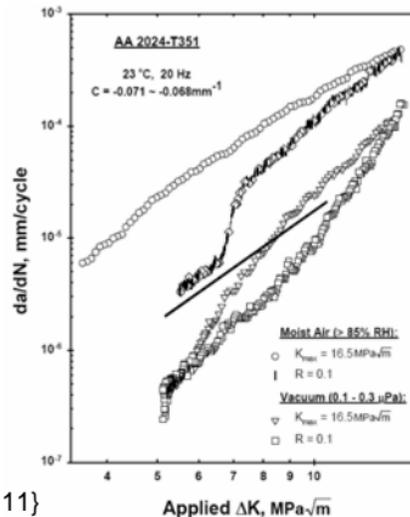
Alliages d'aluminium (2xxx)

- Effet de l'environnement dû à la présence **d'eau**,
- L'air ambiant (humide) n'est pas un environnement neutre en fatigue,
- **Fort effet** du milieu sur les **vitesse de fissuration** entre l'air et le vide,
- Changements de **cristallographie** de fissuration.



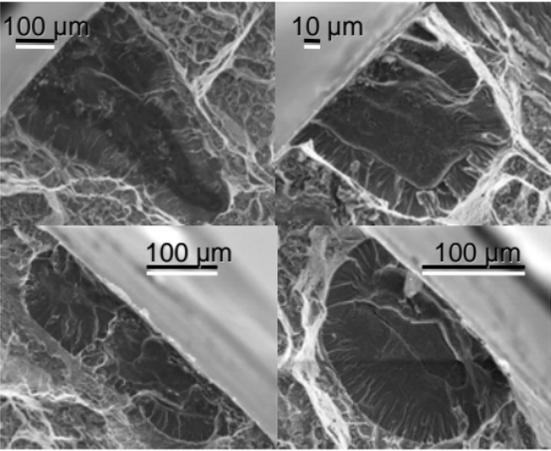
dans les **milieux humides**,
aucune facette cristallographique

dans le **vide**,
facettes cristallographiques {111}

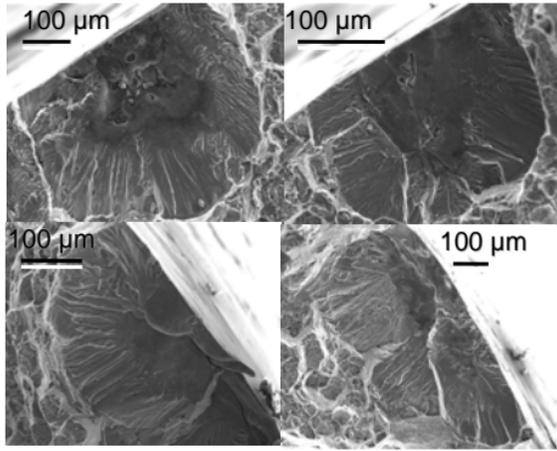


Démarche expérimentale :

fatigue corrosion dans NaCl 0.5 M (pH=7),
f=0.1 Hz

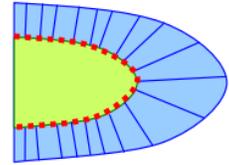
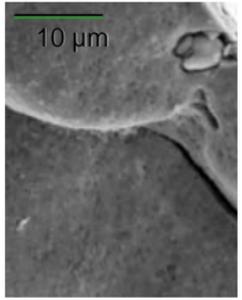


fatigue à l'air sur éprouvettes **pré-corrodées 7h**,
f=1 Hz

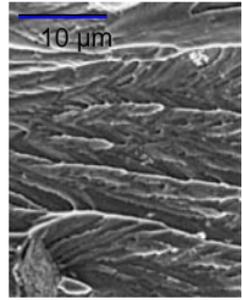


R = 0.1 et 0.6, σ_{max} = Re, 80% Re et 60% Re

FC
intergranulaire



TRANSITION



FC
transgranulaire



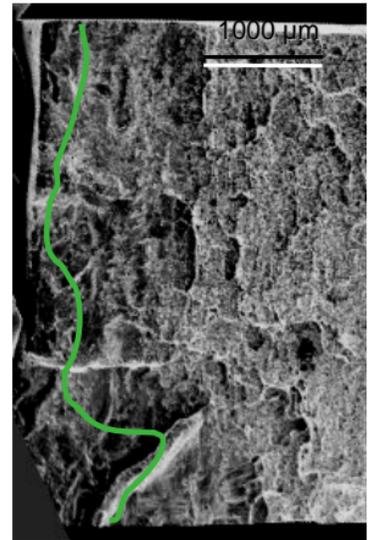
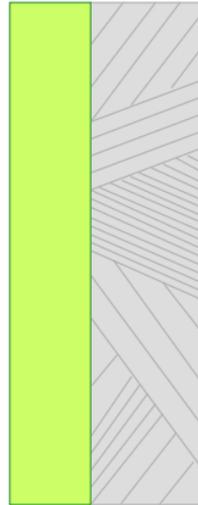
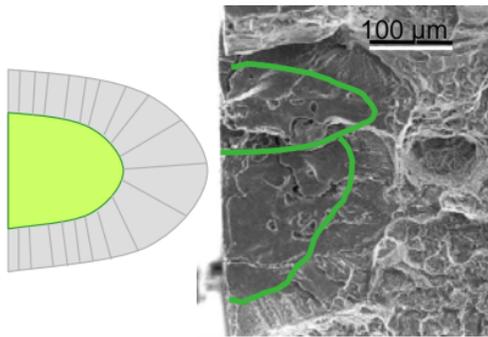
FC intergranulaire

Morphologie

Cinétique

Mécanisme

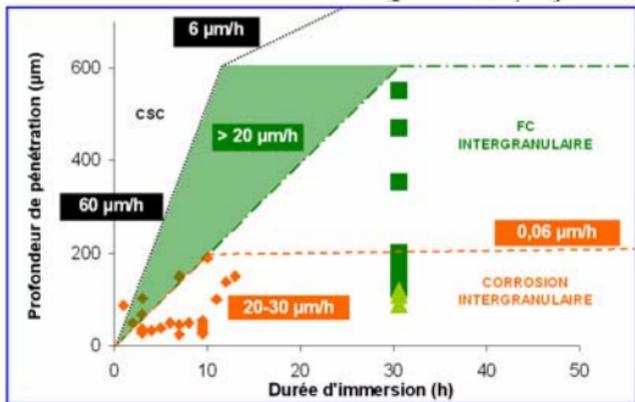
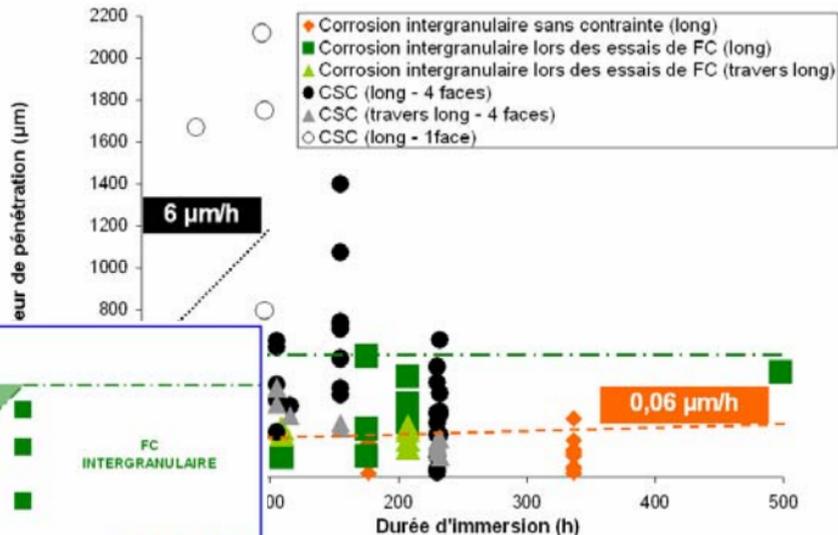




⇒ On retrouve les mêmes morphologies qu'en CSC :

- des défauts **semi-elliptiques isolés**
- des fissures **à front rectiligne** s'étendant sur toute la largeur de l'éprouvette.

Synergie :



FC intergranulaire

CSC (traction lente)

CI (immersion)

FC intergranulaire

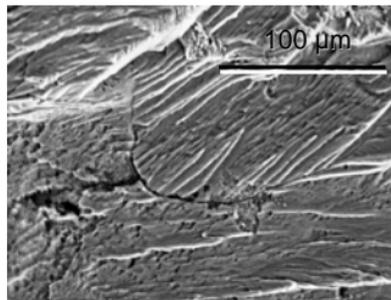
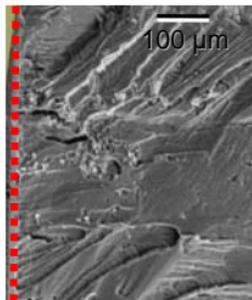
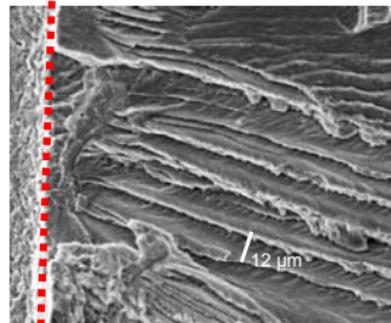
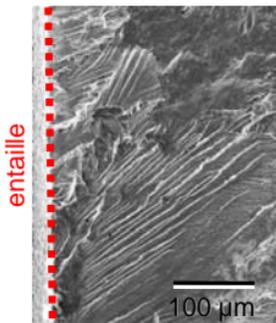
- ⇒ Propagation intergranulaire rapide d'au moins **20 $\mu\text{m}/\text{h}$** saturant vers **600 μm** .
- ⇒ Même mécanisme qu'en CSC : **DA assistée par la contrainte (cyclique)**.
- ⇒ Au delà de 600 μm , les fissures sont **transgranulaires**.

Morphologie

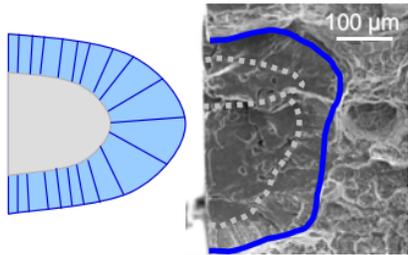
Cinétique



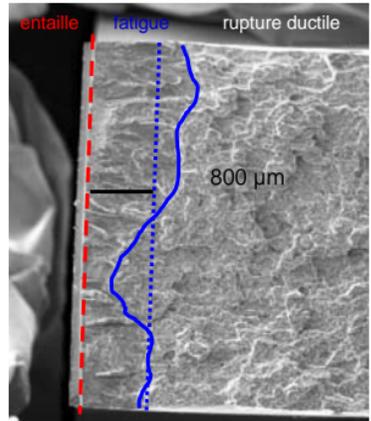
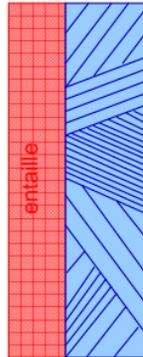
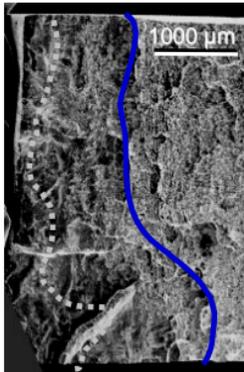
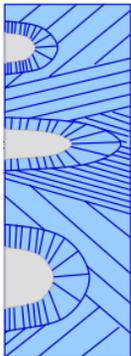
Faciès de rupture :

éprouvette entaillée sollicitée en **fatigue corrosion** $R=0.6$
 $\sigma_{\max}=250 \text{ MPa}$
 $f=0.1 \text{ Hz}$ éprouvette entaillée sollicitée en **fatigue à l'air** $R=0.6$
 $\sigma_{\max}=250 \text{ MPa}$
 $f=1 \text{ Hz}$ 

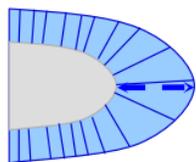
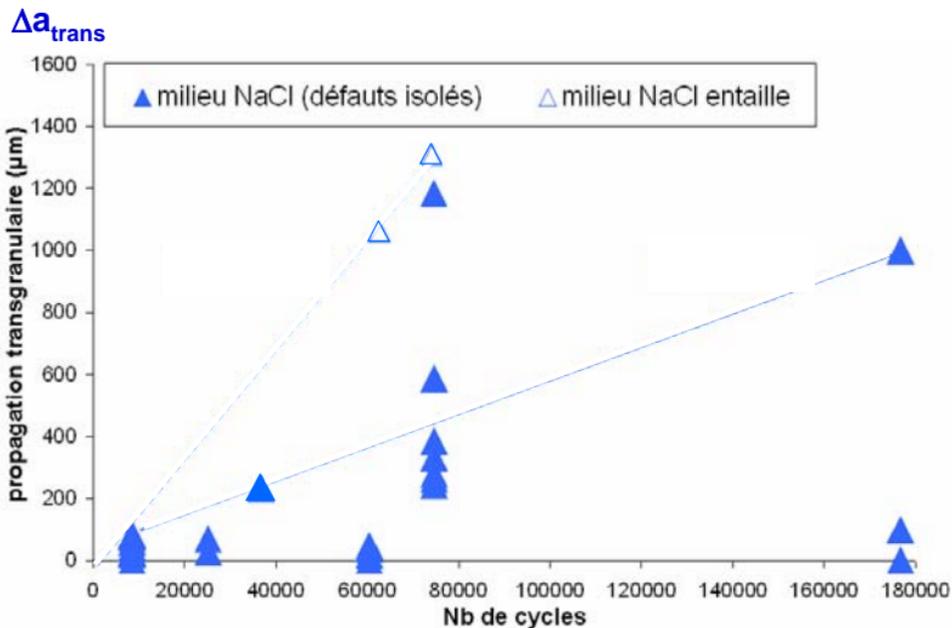
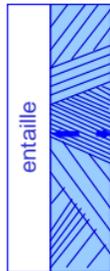
⇒ Couronne Semi-elliptique



⇒ Front rectiligne

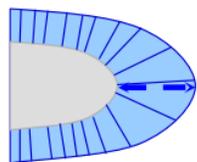
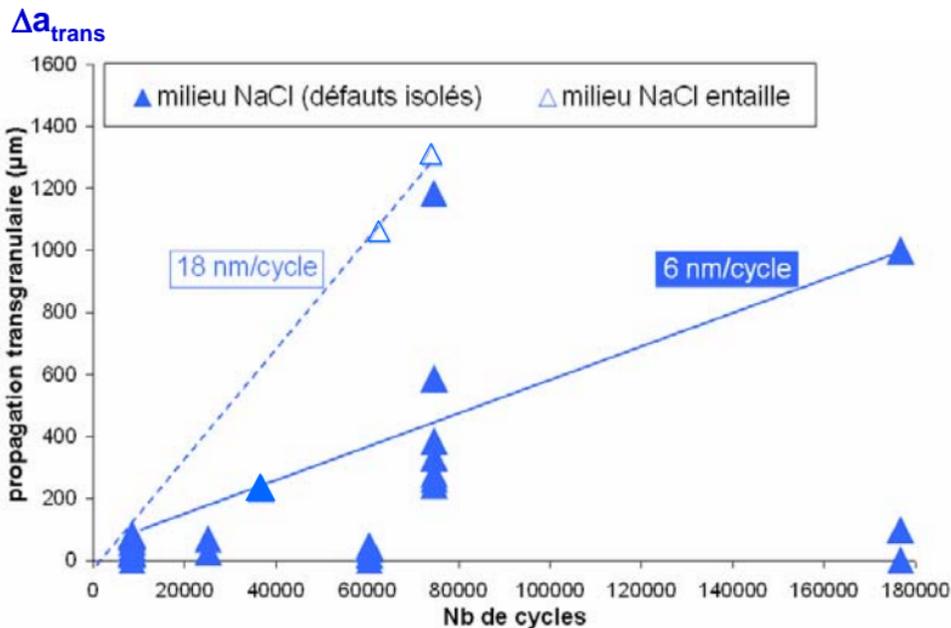
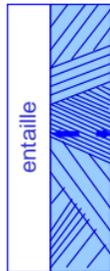


Essais de **fatigue corrosion** ($R = 0.6$, $f = 0.1$ Hz et $\sigma_{\max} = 250$ MPa)
en milieu NaCl 0.5 M, pH = 7

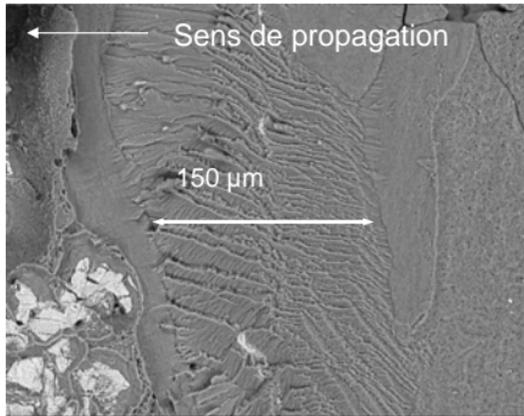

 Δa_{trans}


→ Les zones transgranulaires en FC peuvent s'étendre sur **plus d'un millimètre** au delà du défaut intergranulaire ou de l'entaille.

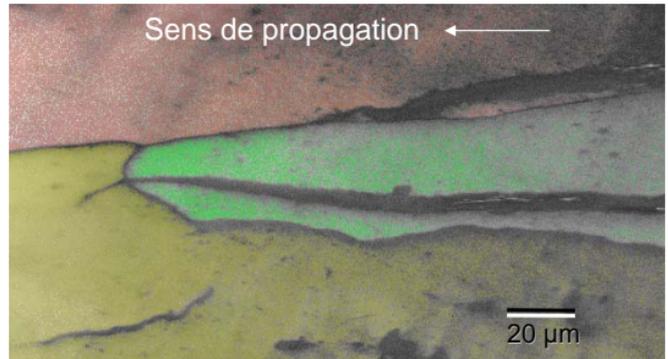
Essais de **fatigue corrosion** ($R = 0.6$, $f = 0.1$ Hz et $\sigma_{\max} = 250$ MPa)
en milieu NaCl 0.5 M, pH = 7


 Δa_{trans}


→ Les zones transgranulaires en FC peuvent s'étendre sur **plus d'un millimètre** au delà du défaut intergranulaire ou de l'entaille.



Arrêt de la propagation sur un joint de grains



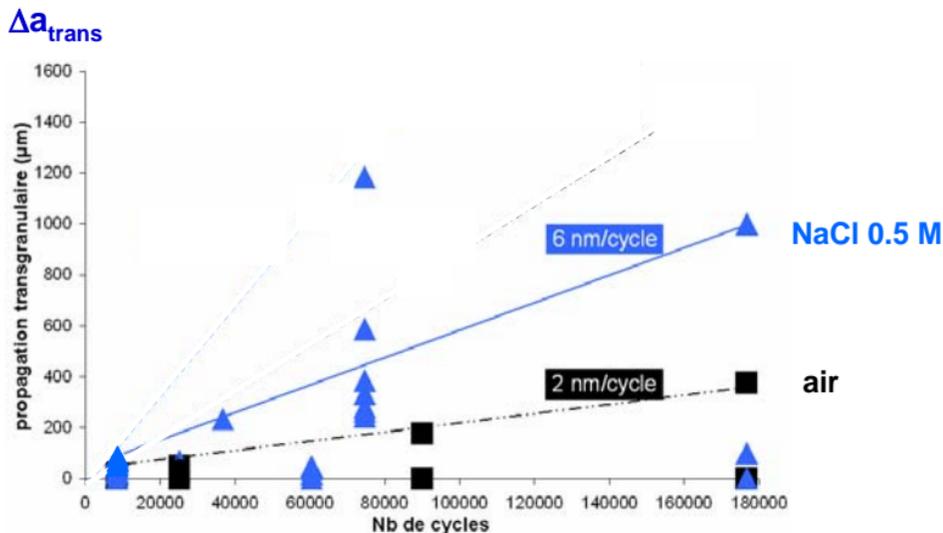
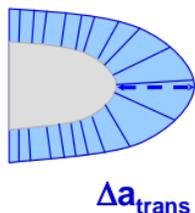
Franchissement transgranulaire d'un joint de grains

⇒ Le franchissement des joints de grains freine la propagation sans l'arrêter.



Synergie :

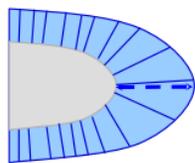
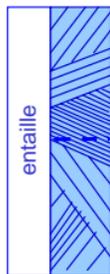
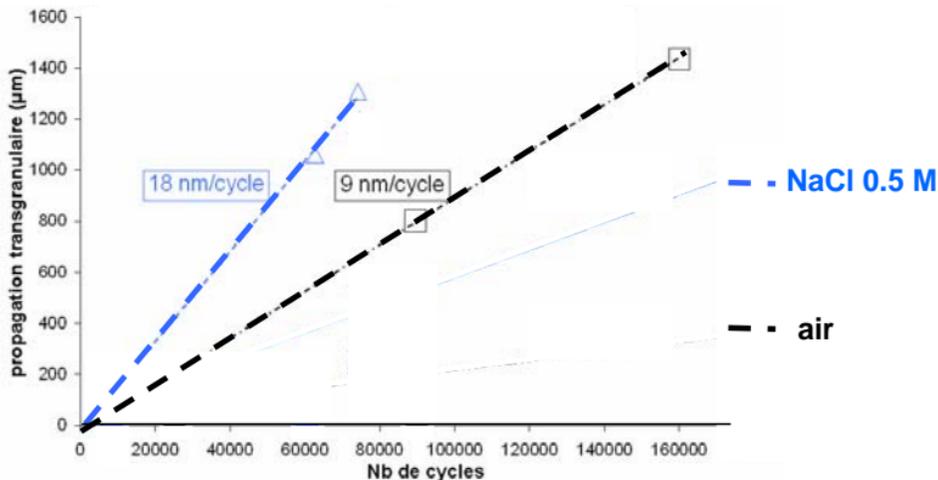
Comparaison des profondeurs transgranulaires
entre les essais de **fatigue en milieu NaCl 0.5 M**
et les essais de fatigue **à l'air sur éprouvettes pré-corrodées**



- ⇒ En milieu corrosif, 90% des défauts intergranulaires ont donné lieu à une propagation transgranulaire, contre 50% à l'air.
- ⇒ Un **facteur d'accélération 2 à 3** entre le milieu chloruré et l'air.

Synergie :

Comparaison des profondeurs transgranulaires
entre les essais de **fatigue en milieu NaCl 0.5 M**
et les essais de fatigue **à l'air sur éprouvettes pré-corrodées**

 Δa_{trans}  Δa_{trans} 

⇒ En milieu corrosif, 90% des défauts intergranulaires ont donné lieu à une propagation transgranulaire, contre 50% à l'air.

⇒ Un **facteur d'accélération 2 à 3** entre le milieu chloruré et l'air.

FC intergranulaire

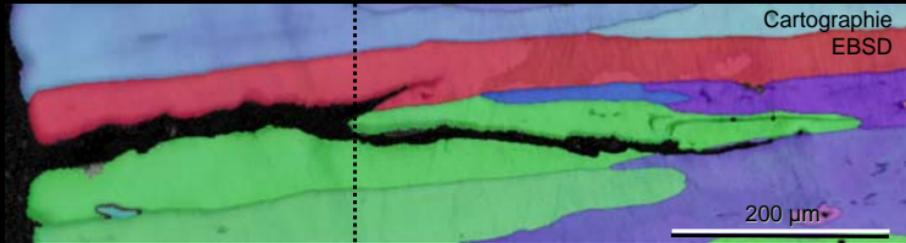
- ⇒ Propagation intergranulaire rapide d'au moins **20 $\mu\text{m}/\text{h}$** saturant vers **600 μm** .
- ⇒ Même mécanisme qu'en CSC : **DA assistée par la contrainte (cyclique)**.
- ⇒ Au delà de 600 μm , les fissures sont **transgranulaires**.

FC transgranulaire

- ⇒ **Amorçage** facile à partir des **défauts de corrosion localisée**.
- ⇒ Accélération entre l'air humide et NaCl 0.5 M : un **facteur 2 à 3**.
- ⇒ Mécanisme de **fatigue plastique transgranulaire assistée par le milieu corrosif**.

**AMORCAGE
INTERGRANULAIRE**

**PROPAGATION
TRANSGRANULAIRE**



CISC

FC transgranulaire

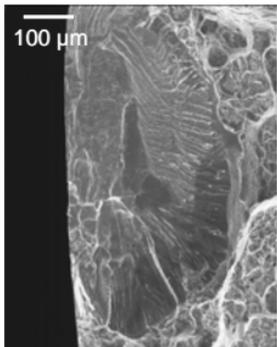
- facteur 1 à 3 sur le régime rapide
- **facteur 100** sur le régime lent

- facteur 2 à 3

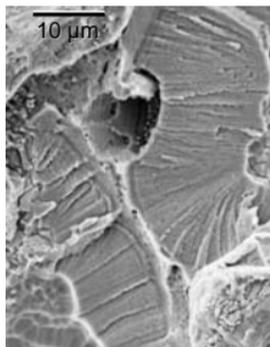
TRANSITION

Choix du critère de transition (a , σ_{\max} , K , ΔK)

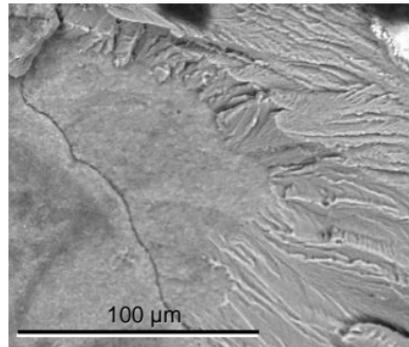
- ⇒ Forte tendance de ce système à passer d'un endommagement intergranulaire à un endommagement **transgranulaire**



Fatigue à l'air sur
éprouvette pré-corrodée



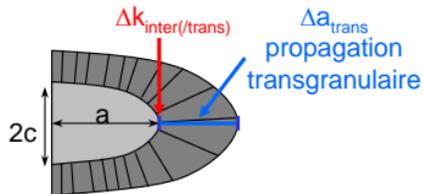
Traction lente en milieu
corrosif



Fatigue corrosion

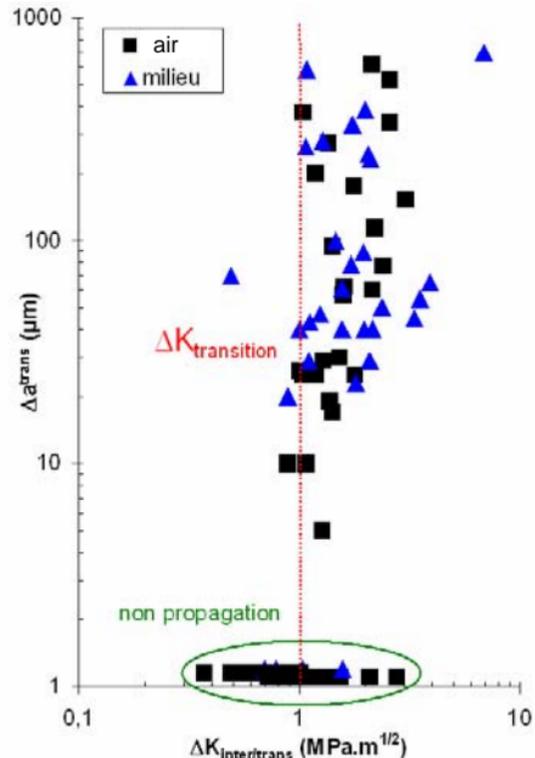
- ⇒ Transition en terme de **facteur d'intensité de contraintes (K , ΔK)**.

Amplitude du facteur d'intensité de contraintes associé à chaque défaut isolé :

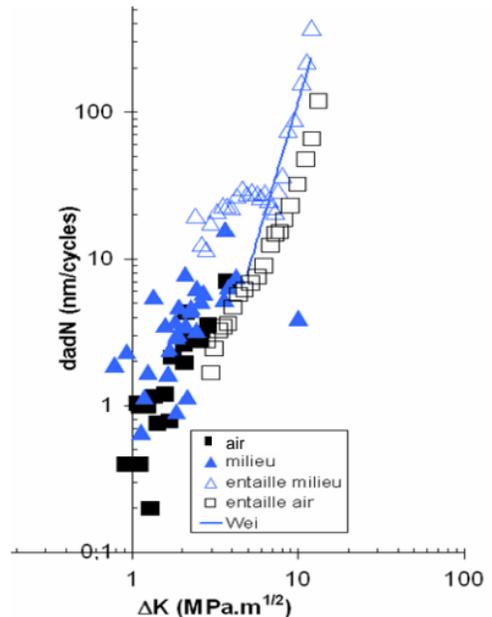
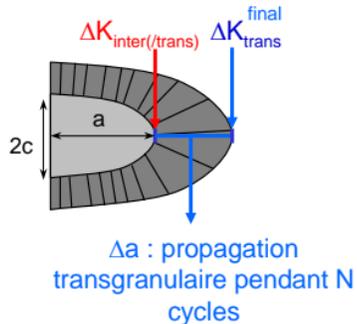


⇒ $\Delta K_{\text{transition}} = 1 \text{ MPa.m}^{1/2}$

⇒ Effet important de la cristallographie



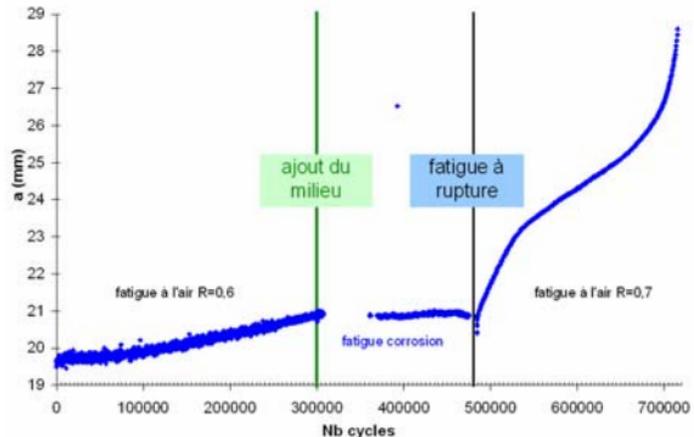
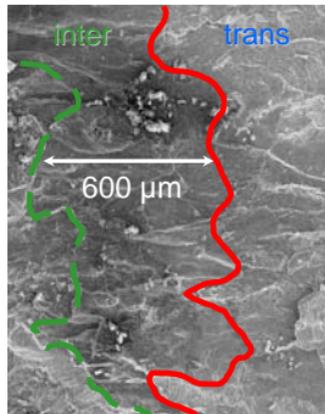
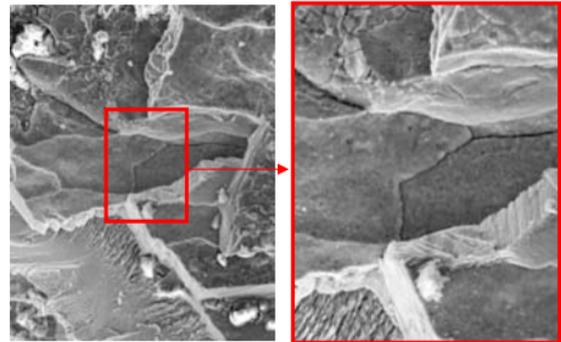
Unification des vitesses de propagation en fonction de ΔK :



- ⇒ ΔK permet de rationaliser les observations sur des défauts de taille et de forme variables.
- ⇒ La vitesse en milieu est supérieure à la vitesse à l'air avec un facteur qui dépend du domaine de ΔK :
 - **facteur 5** aux faibles ΔK (entre 3 et 5 MPa. m^{1/2})
 - **facteur 2** pour les ΔK plus élevés (entre 7 et 10 MPa. m^{1/2})
- ⇒ Bonne corrélation avec les données de la littérature.

Propagation des fissures longues :

- 1- reprise de la propagation **intergranulaire** en dessus ou en dessous du plan principal de propagation
- 2- zones intergranulaires de **600 μm** de long
- 3- **arrêt** macroscopique de la propagation des fissures **lors de l'ajout du milieu**, puis **reprise brutale** de la propagation transgranulaire **après retrait du milieu**

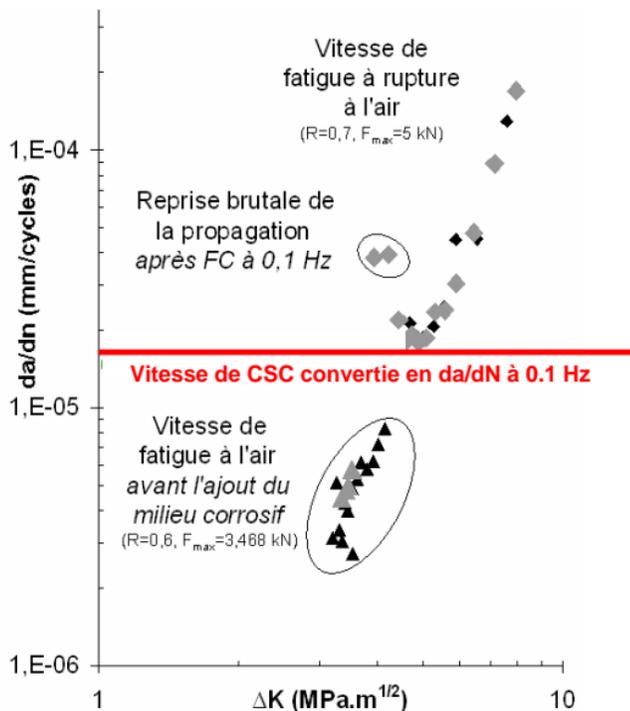


Propagation des fissures longues :

1- reprise de la propagation **intergranulaire**

⇒ à 0.1 Hz,

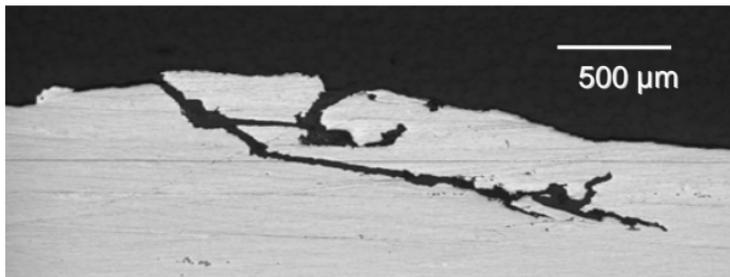
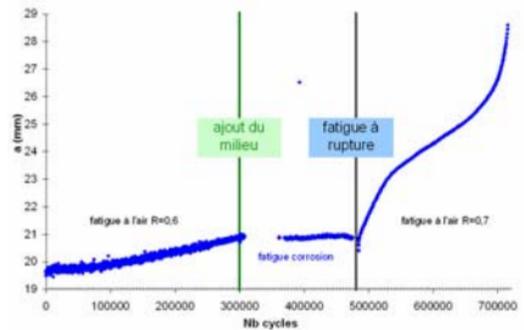
$$\frac{1}{f} \left(\frac{da}{dt} \right)_{\text{corrosion}} > \left(\frac{da}{dN} \right)_{\text{fatigue}}$$



Propagation des fissures longues :

2- arrêt macroscopique de la propagation des fissures
lors de l'ajout du milieu

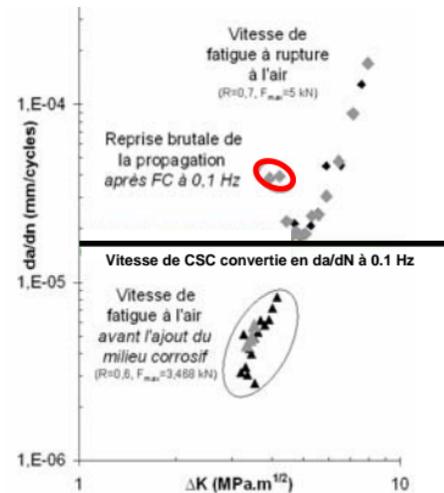
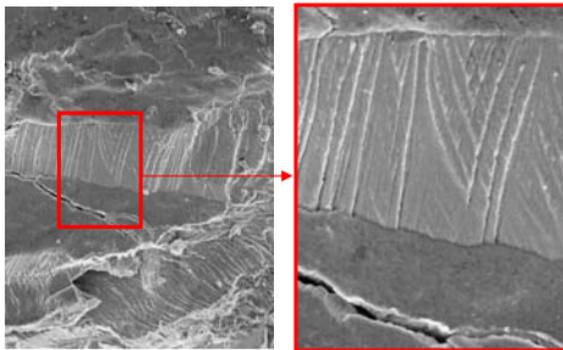
⇒ multifissuration intergranulaire



Propagation des fissures longues :

3- reprise brutale de la propagation transgranulaire après retrait du milieu

⇒ **coalescence** par fatigue transgranulaire des zones intergranulaires



FC intergranulaire

- ⇒ Propagation intergranulaire rapide d'au moins **20 $\mu\text{m}/\text{h}$** saturant vers **600 μm** de profondeur.
- ⇒ Même mécanisme qu'en CSC : **DA assistée par la contrainte (cyclique)**.
- ⇒ Au delà de 600 μm , les fissures sont **transgranulaires**.

FC transgranulaire

- ⇒ **Amorçage** facile à partir des **défauts de corrosion localisée**.
- ⇒ **Deux mécanismes** : CI assistée par la contrainte (cyclique) et fatigue transgranulaire assistée par l'environnement.
- ⇒ Nette accélération entre l'air humide et NaCl 0.5 M : un **facteur 2 à 5**.

TRANSITION

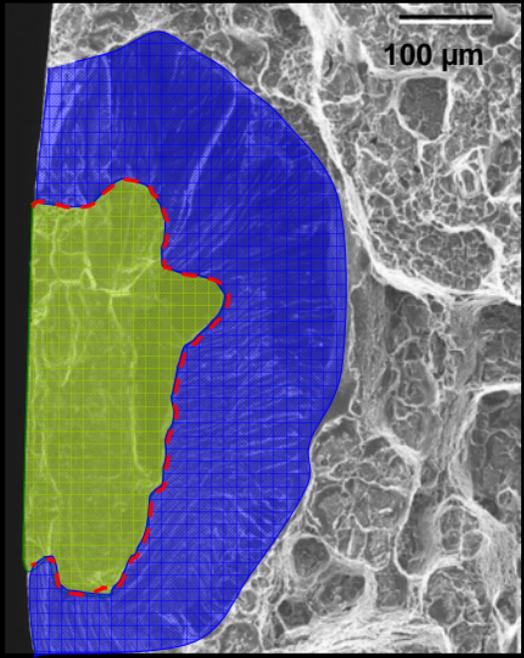
- ⇒ **Transition facile** entre le défaut de CI et une fissure transgranulaire.
- ⇒ Transition caractérisée en termes de ΔK : **$\Delta K_{\text{transition}} = 1 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$** .
- ⇒ Fort effet de la **fréquence** dans la propagation des **fissures longues**.

FC intergranulaire

FC transgranulaire

Transition

FC intergranulaire

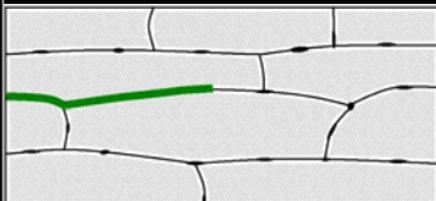


FC transgranulaire

TRANSITION

Caractériser toute l'étendue de l'endommagement en FC

AMORCAGE INTERGRANULAIRE



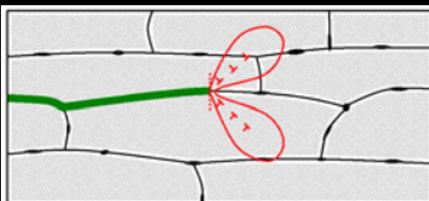
- en l'absence de contrainte
- sous contraintes monotones
- sous contraintes cycliques

**Mécanisme de dissolution
anodique
assistée par la contrainte.**

Rôle de la contrainte :

- ouvrir mécaniquement la fissure
- accélérer la propagation par concentration de contraintes

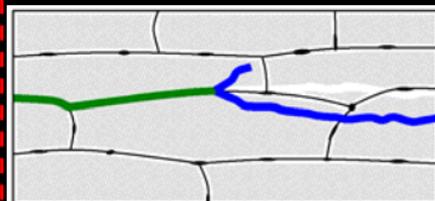
TRANSITION



Δk_{crit} (transition inter/trans)

Compétition : $da/dn > da/dt$
(transition trans/inter)

PROPAGATION TRANSGRANULAIRE



FC transgranulaire

**Effet d'accélération
du milieu :
2 à 5 suivant le domaine de ΔK**

Conclusion générale

Corrosion Intergranulaire

- ⇒ En milieu peu oxydant, l'alliage 2024 T351 est sensible à la **CI**, à cause d'une **zone appauvrie en cuivre**.
- ⇒ Il se forme un défaut semi-elliptique de **200 μm de profondeur en 7h d'immersion**.
- ⇒ **Deux régimes** de propagation : **20/30 $\mu\text{m}/\text{h}$** dans les 7 premières heures
0.06 $\mu\text{m}/\text{h}$

Corrosion Sous Contrainte

- ⇒ **En présence d'une contrainte**, la CI peut atteindre des vitesses très importantes :
 - **facteur entre 1 et 3**, dans le régime rapide (en milieu oxygéné),
 - **facteur 100**, dans le régime lent (en milieu confiné),
 - Facteur 3 sur la profondeur de transition : de **200 à 600 μm** ,

Transition

- ⇒ Forte propension à passer d'un endommagement intergranulaire à un endommagement transgranulaire.

Fatigue Corrosion transgranulaire

- ⇒ **L'effet du milieu sur la propagation transgranulaire** a été caractérisé :
 - **facteur 2 à 5** suivant le domaine de ΔK étudié.

Conclusion générale

Corrosion Intergranulaire

- ⇒ En milieu peu oxydant, l'alliage 2024 T351 est sensible à la **CI**, à cause d'une **zone appauvrie en cuivre**.
- ⇒ Il se forme un défaut semi-elliptique de **200 μm de profondeur en 7h d'immersion**.
- ⇒ **Deux régimes** de propagation : **20/30 $\mu\text{m}/\text{h}$** dans les 7 premières heures
0.06 $\mu\text{m}/\text{h}$

Corrosion Sous Contrainte

- ⇒ **En présence d'une contrainte**, la CI peut atteindre des vitesses très importantes :
 - **facteur entre 1 et 3**, dans le régime rapide (en milieu oxygéné),
 - **facteur 100**, dans le régime lent (en milieu confiné),
 - **facteur 3** sur la profondeur de transition : de **200 à 600 μm** ,

Transition

- ⇒ Forte propension à passer d'un endommagement intergranulaire à un endommagement transgranulaire.

Fatigue Corrosion transgranulaire

- ⇒ **L'effet du milieu sur la propagation transgranulaire** a été caractérisé :
 - **facteur 2 à 5** suivant le domaine de ΔK étudié.

- **Méthodologie** efficace pour étudier :
 - ⇒ les **défauts intergranulaires** fins
 - ⇒ les **transitions** entre les différents types d'endommagement
- **Méthodologie applicable aux nouvelles générations** d'alliage 2xxx (Al-Li), qui présentent les même ingrédients métallurgiques, avec un poids sans doute différent.
- Quantifier les effets de la **fréquence**,
Caractériser les défauts et calculer le facteur d'intensité de contraintes **en 3D**,
Étudier les effets de différents **environnements corrosifs**.
- Pour établir clairement **l'effet de la contrainte** :
 - ⇒ **calculs élasto-plastiques** d'ouverture de fond de fissure.
- Pour progresser dans la compréhension des **mécanismes de FC transgranulaire** :
 - ⇒ **modélisation et simulation** à l'échelle du premier grain en fond de fissure.



**DU DEFAUT DE CORROSION INTERGRANULAIRE
A LA FISSURE DE FATIGUE (CORROSION)...**

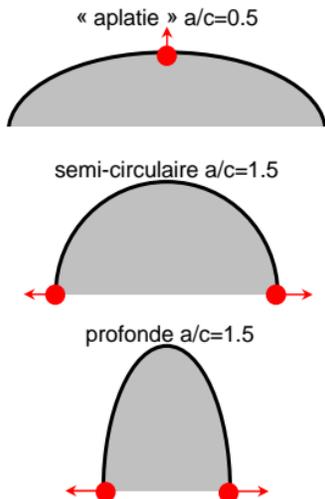
8 avril 2008

Merci de votre attention

CORROSION SOUS CONTRAINTE, (CSC)

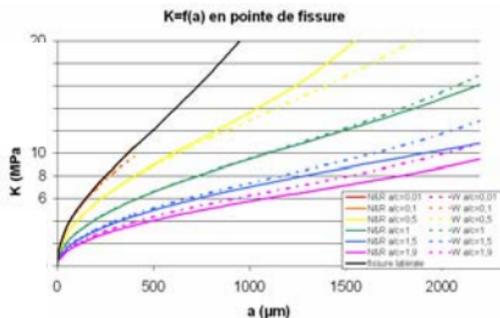
Coalescence

Distribution du facteur d'intensité des contraintes sur le pourtour d'un défaut semi-elliptique **isolé** :



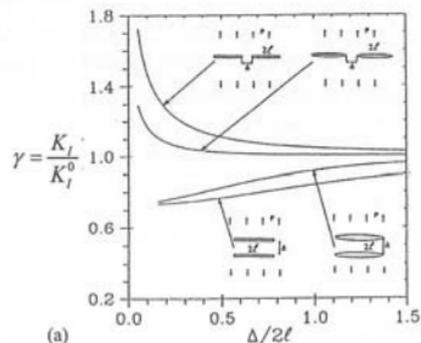
Les défauts profonds ont un facteur d'intensité des contraintes maximal en surface, ce qui favorise leur coalescence pour former un défaut s'étendant sur toute la largeur de l'éprouvette.

Calcul du facteur d'intensité de contrainte pour une entaille et un défaut semi-elliptique :



Le facteur d'intensité des contraintes associé aux entailles est plus élevé que celui associé aux défauts semi-elliptiques isolés, ce qui permet d'expliquer les différences de vitesses de CSC observées entre les éprouvettes lisses pré-corrodées et les éprouvettes entaillées.

Effet des interactions entre défauts isolés sur le facteur d'intensité des contraintes :



La localisation de la corrosion sur une petite fenêtre augmente la configuration coplanaire des défauts, ce qui favorise la coalescence et amplifie la propagation des fissures.