

## **X – La corrosion des métaux**

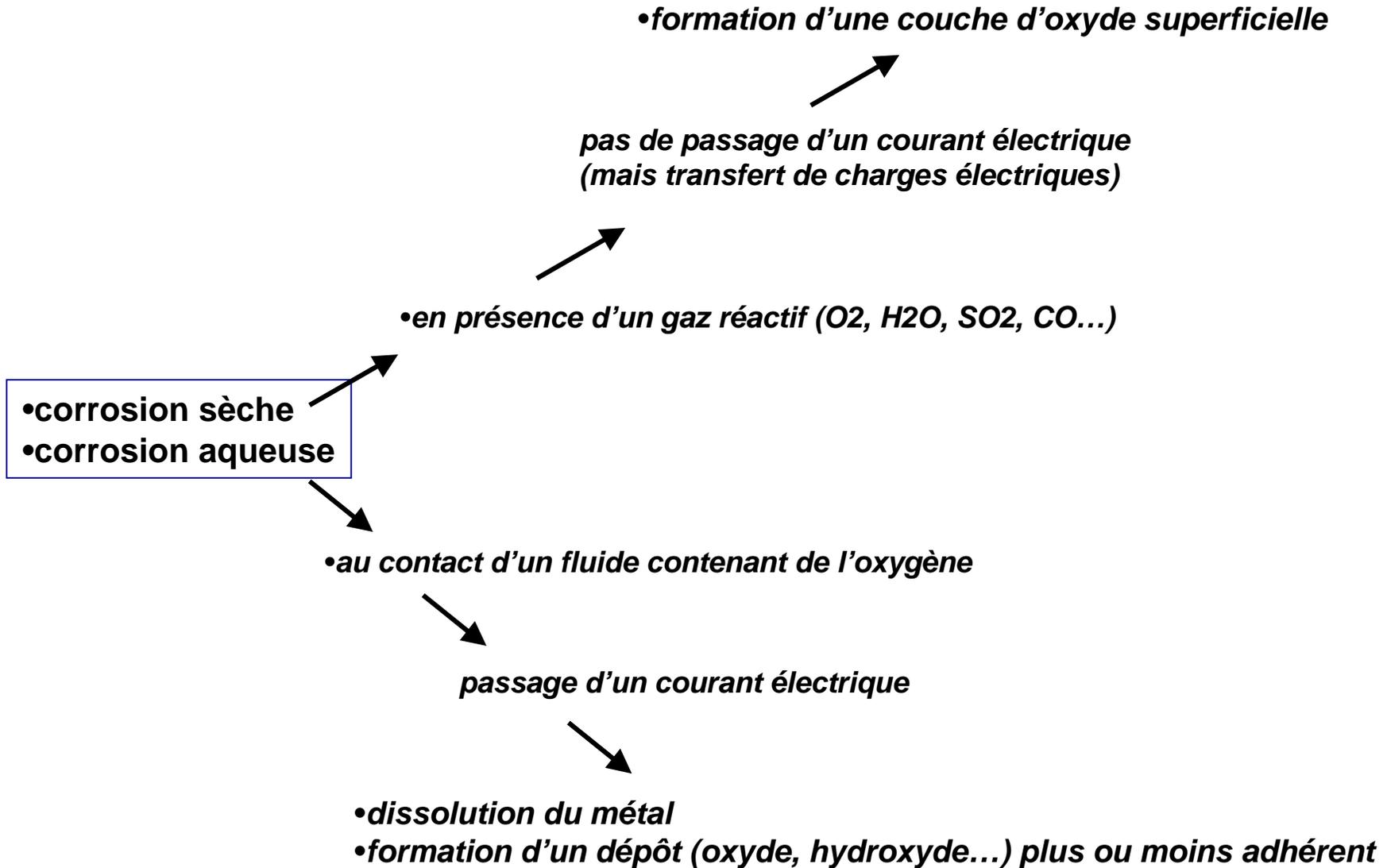
**La norme ISO 8044 définit la corrosion comme suit :**

*La corrosion est une interaction physico-chimique entre un métal et son environnement entraînant des modifications dans les propriétés du métal et souvent une dégradation fonctionnelle du métal lui-même, de son environnement ou du système technique constitué par les deux facteurs...*

**La corrosion représente la perte de 100 millions de tonne d'acier par an (5 fois la production totale française, 15% de la production mondiale !)**

**Elle frappe essentiellement les matériaux métalliques mais touche aussi :**

- les bétons par attaque chimique**
- les minéraux (granite, calcaire, briques ...)**
- les polymères...**



# 1) la corrosion sèche



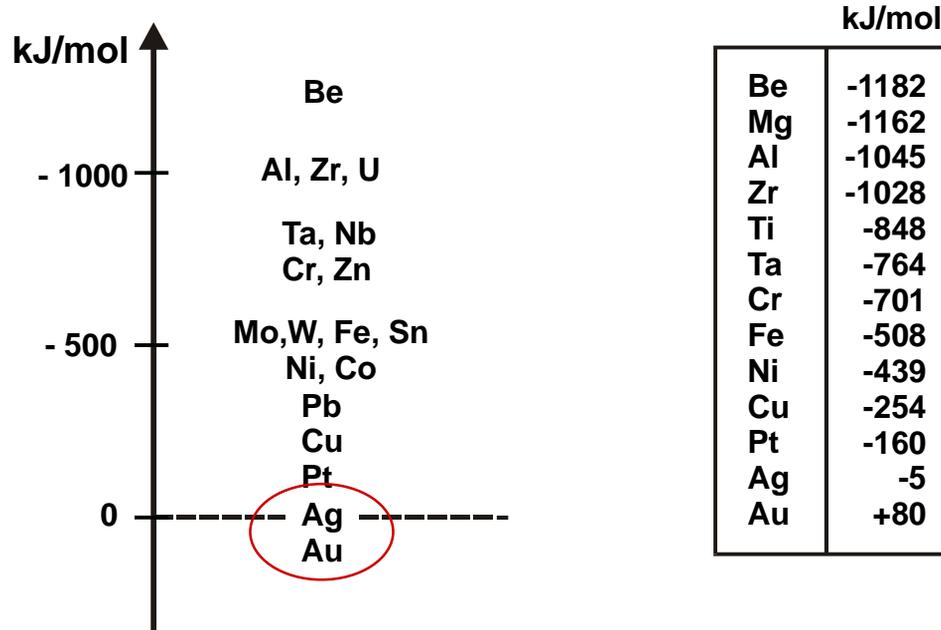
$$\Delta G = \Delta U - T\Delta S$$

**$\Delta G > 0$**

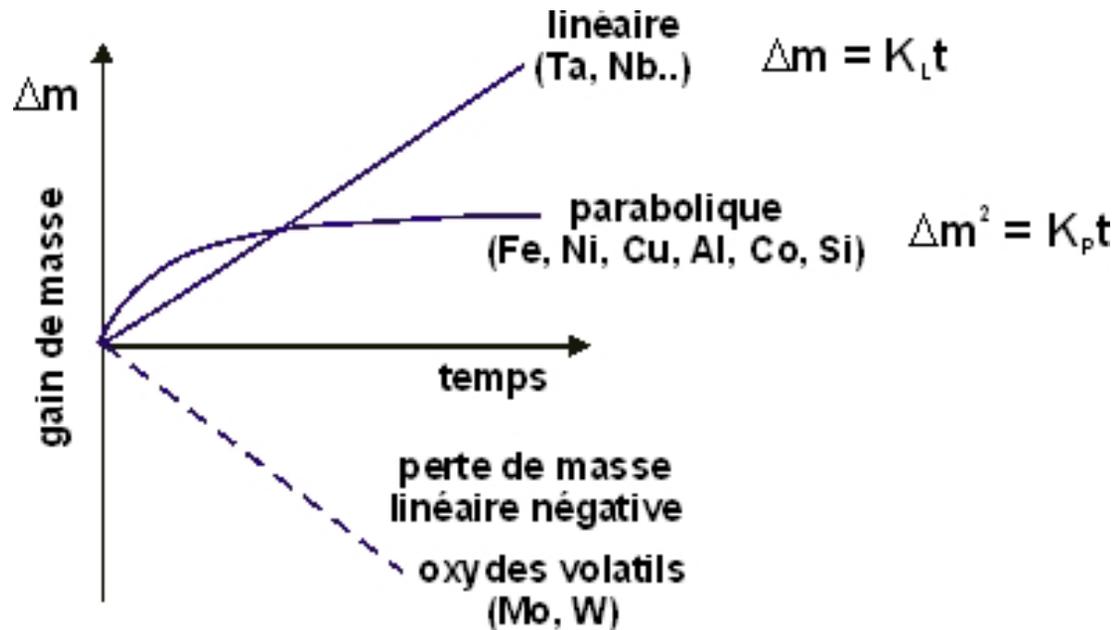
*la réaction n'est pas spontanée  
le métal est stable*

**$\Delta G < 0$**

*la réaction est spontanée  
le métal s'oxyde*



la vitesse d'oxydation et la variation de masse en fonction du temps doivent aussi être pris en compte :

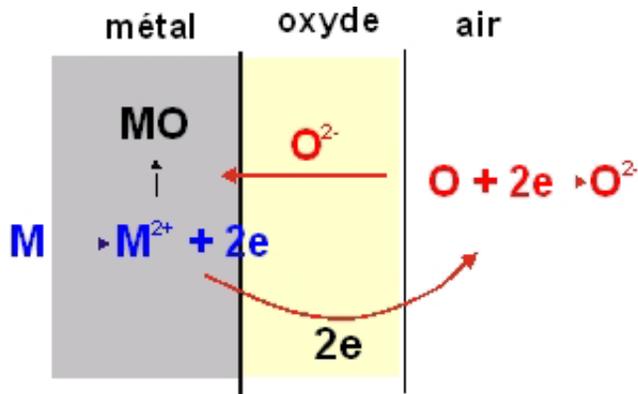


$K_L$  et  $K_p$  sont constants à une température donnée mais augmentent avec la température selon une loi d'Arrhénius

$$K_L = A_L \exp\left(-\frac{Q_L}{kT}\right)$$

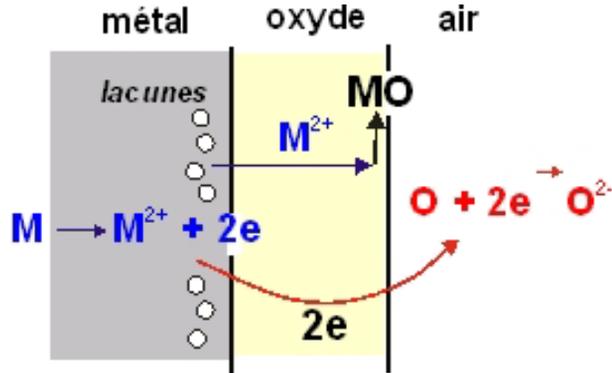
$$K_p = A_p \exp\left(-\frac{Q_p}{kT}\right)$$

# mécanismes de la corrosion sèche :



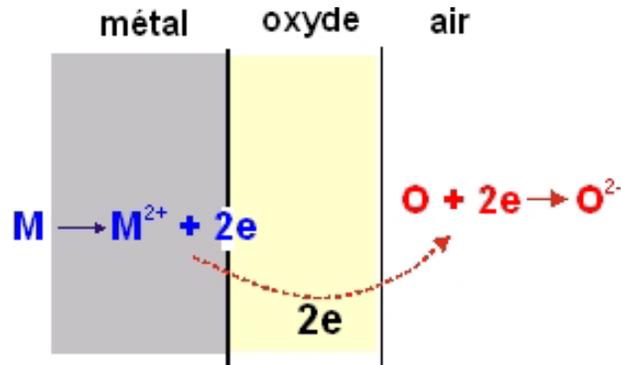
les ions M<sup>2+</sup> se déplacent lentement dans l'oxyde

la couche d'oxyde croît à l'interface métal-oxyde (Ti, Zr, U)



les ions O<sup>2-</sup> se déplacent lentement dans l'oxyde

la couche d'oxyde croît à l'interface oxyde-air des lacunes se forment entre le métal et l'oxyde (Cu, Fe, Cr, Co, Ni)

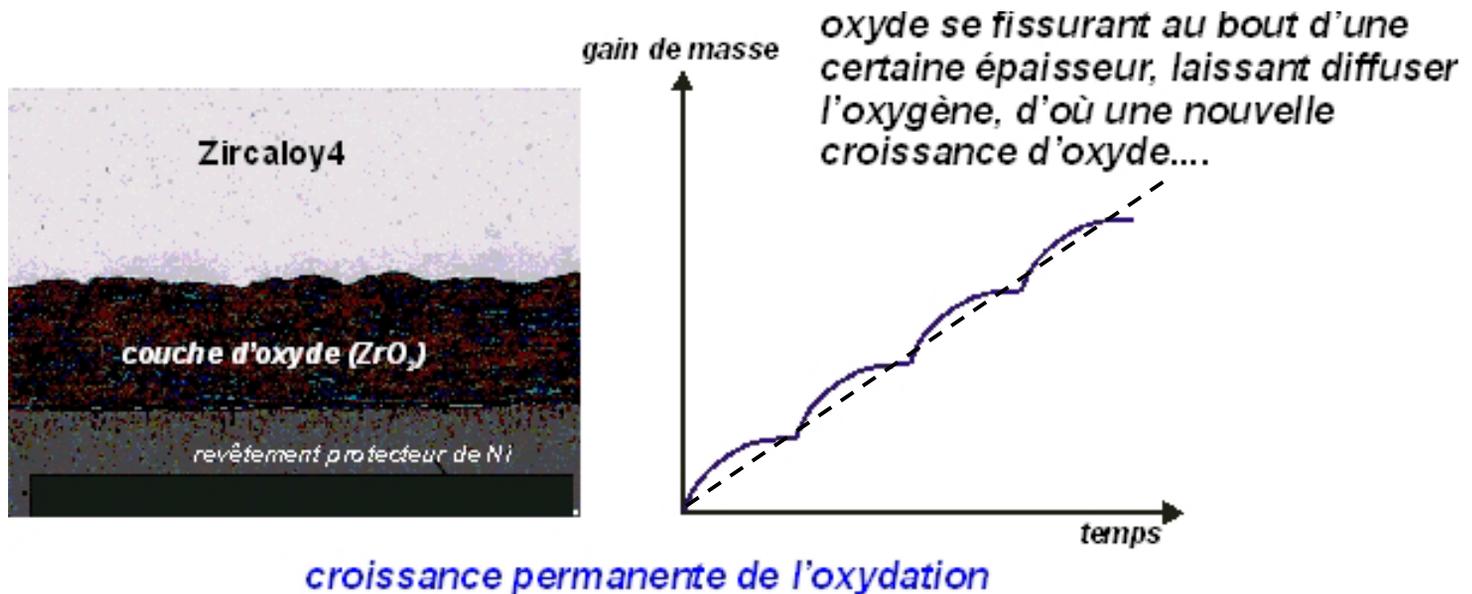


les électrons<sup>-</sup> migrent très lentement

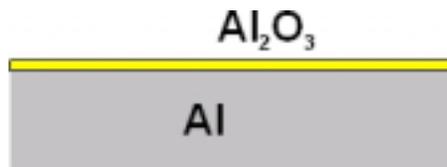
selon la vitesse des ions, la couche d'oxyde croît très lentement à l'une ou l'autre des interfaces (Al)

les lois de la diffusion expliquent la forme parabolique :  
*plus la couche d'oxyde est épaisse, moins la diffusion est facile*

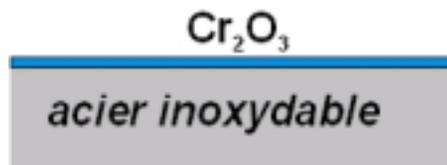
**Mais : des fissurations ou des déformations (décollement) de la couche d'oxyde limite son côté protecteur et permet une nouvelle progression de l'oxyde d'où la loi linéaire observée**



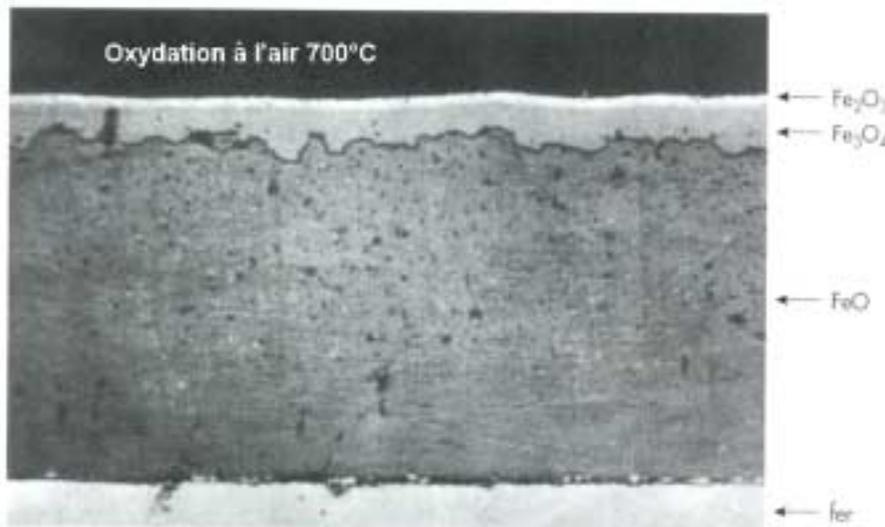
**Al : très forte énergie d'oxydation mais vitesse très lente**  
**W : faible énergie mais vitesse élevée**



- l'aluminium est donc protégé par une fine couche d'alumine



-les aciers inoxydables contenant plus de 12% de Cr sont protégés par une couche protectrice et adhérente d'oxyde de Cr

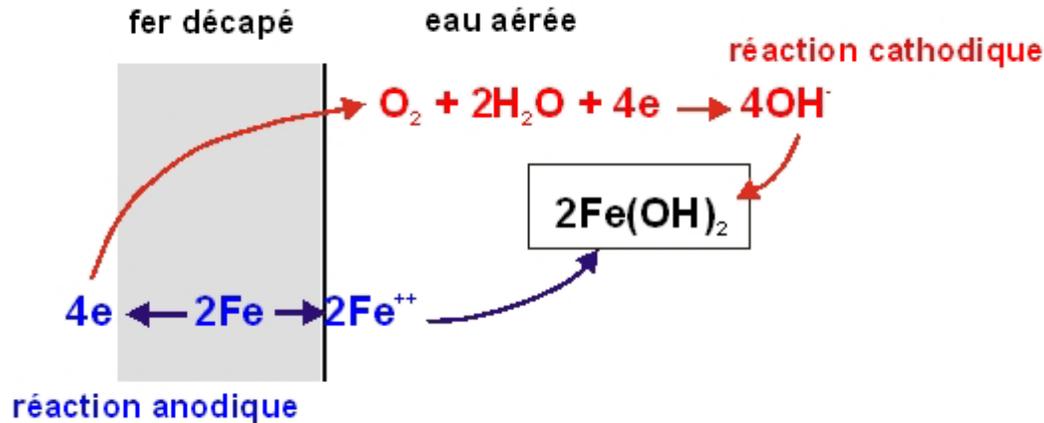


**oxydation sèche du fer**  
***couches fissurées et peu adhérentes***

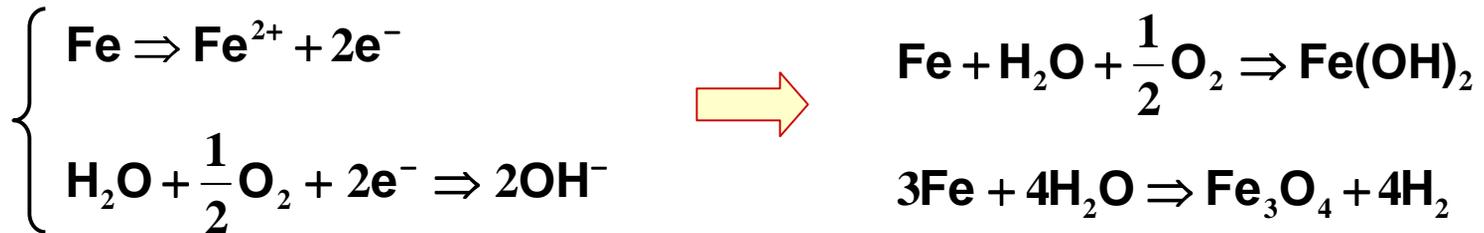
## 2) la corrosion humide ou aqueuse

corrosion : réaction d'oxydo-réduction

réaction électrochimique



*il n'y a plus de couche d'oxyde protectrice...*



***Dans le cas du fer, la corrosion humide (« rouille ») progresse plusieurs millions de fois plus vite que l'oxyde en air sec***

**La corrosion dépend :**

**1) du milieu (environnement)**

- *du pH*
- *du pouvoir oxydant*
- *de la température*
- *de la présence de solutés*

**2) du matériaux (métal)**

- *de sa composition*
- *de sa structure et microstructure*
- *de son état de surface*
- *des contraintes appliquées ou résiduelles...*

**la corrosion peut être**

- **généralisée**
- **localisée**

- *piqûres*
- *crevasse*
- *érosion-corrosion*
- *galvanique*
- *intergranulaire*
- *sous contrainte*
- *...*

***Ce qui compte, ce n'est plus l'énergie d'oxydation mais la différence de potentiel électrochimique entre la cathode et l'anode...***

## a) Corrosion généralisée ou continue

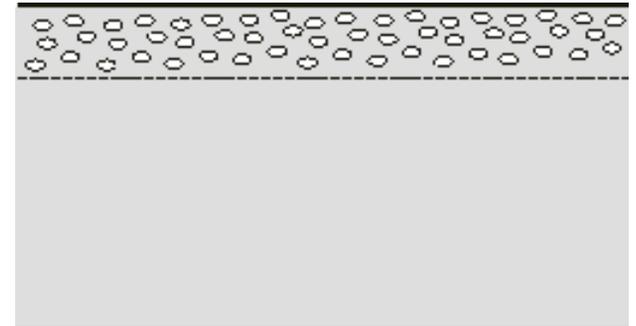
il peut se former une couche d'oxyde ou d'oxyhydroxyde protectrice (passivation)

perte de masse uniforme qui peut être contrôlée et prévisible

→ sur-épaisseurs consommables

→ peu dangereuse mais coûteuse

**! dissolution sélective d'un des constituants d'un alliage :**  
dans les laitons on observe une dézincification superficielle



## b) Corrosion localisée

- se produit dans des milieux quelquefois peu agressifs en apparence
- pertes de masse très faibles mais pouvant entraîner la ruine du matériau
- difficile à détecter
- nécessite la mise en place de techniques de CND (contrôles non-destructifs)

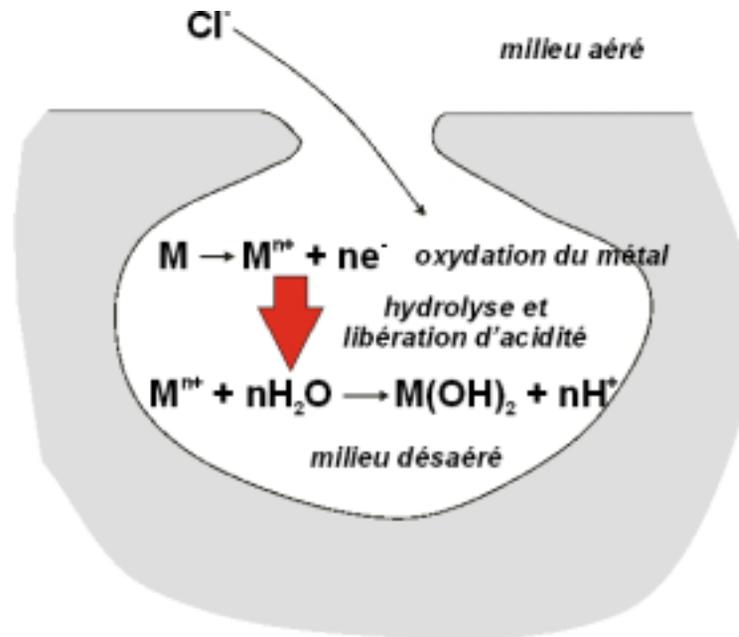
*ultra-sons, courants de Foucault, rayons X ou  $\gamma$ ...*

## Corrosion par piqûres

Due à une dépassivation locale (rupture de la couche passive),  
en milieu réducteur et en présence d'ion chlorure :

- soit par dissolution d'inclusions (MnS par exemple)
- soit par adsorption d'ions  $\text{Cl}^-$  dans la couche de passivation

formation rapide de  
trous hémisphériques  
répartis au hasard



***Touche en particulier les aciers inoxydables en  
milieux chlorurés oxydants  
mais aussi l'Al et le Cu...***

corrosion des métaux

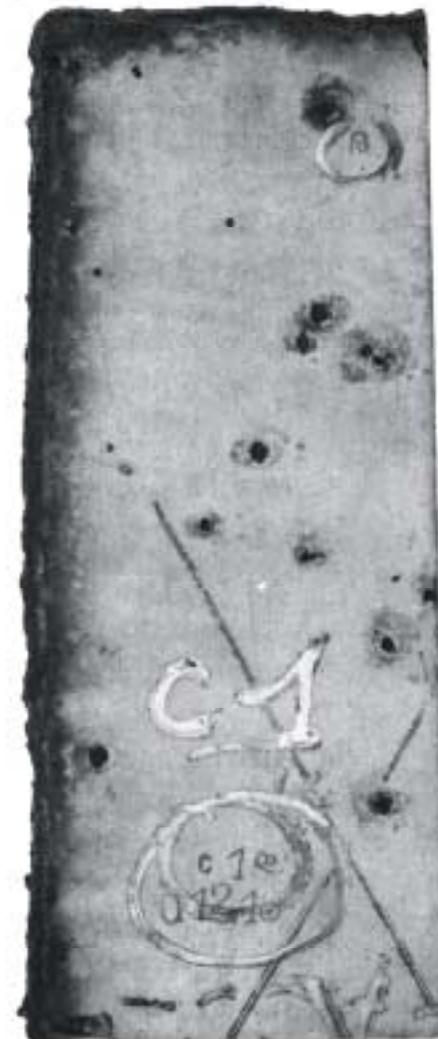


Figure V.1.1. - Corrosion par piqûre d'un acier inoxydable austénitique à 18% Cr et 10% Ni en milieu chloruré (environ 200 ppm  $\text{Cl}^-$ ) contenant probablement des espèces sulfurées.

***Piqûre de corrosion observée par microscopie électronique à balayage et microanalyse dans la tranche d'un tube en Alliage600 (alliage base Ni – 16%Cr- 8%Fe- 74%Ni)***



***image en électrons secondaires***

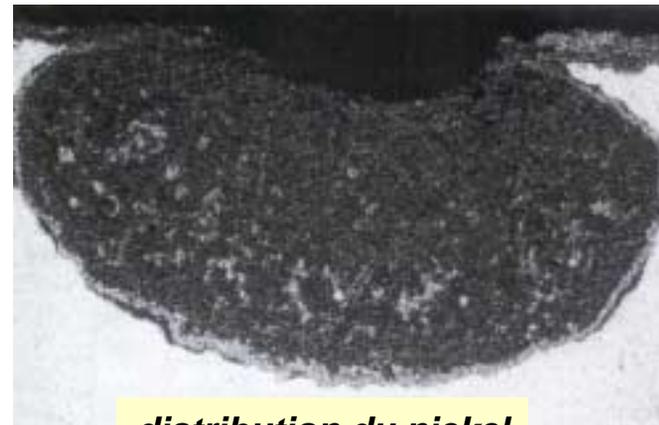


***distribution de l'oxygène***



***distribution du silicium***

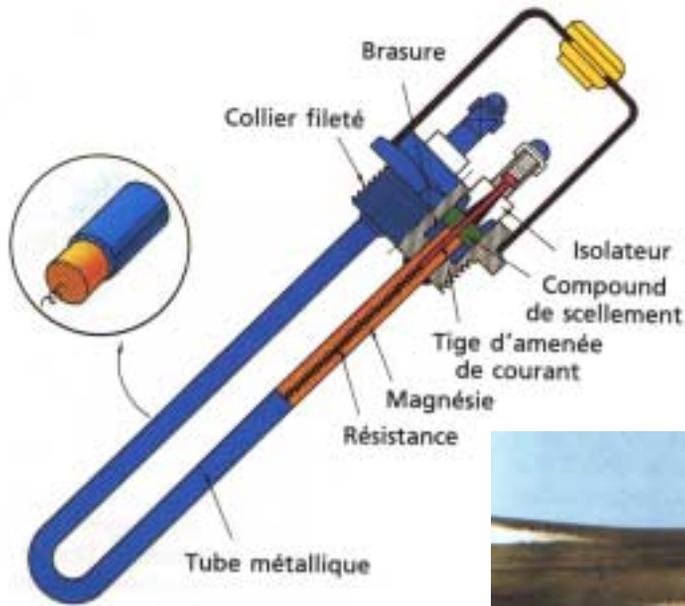
***50µm***



***distribution du nickel***

## Exemple : Chaudière électrique à thermo-plongeurs

*acier 316L (17Cr-12Ni-Mo)*



la moindre piqûre ou fissure de la gaine provoque le gonflement par hydratation de la magnésie interne provoquant une déchirure «en boutonnière» du thermoplongeur.



### **solution :**

- au dessous de 200°C : alliage super-austénitiques (haute teneur en Cr et Ni)
- au dessus de 200°C : alliage de Ni type 690

## corrosion caverneuse ou par crevasses

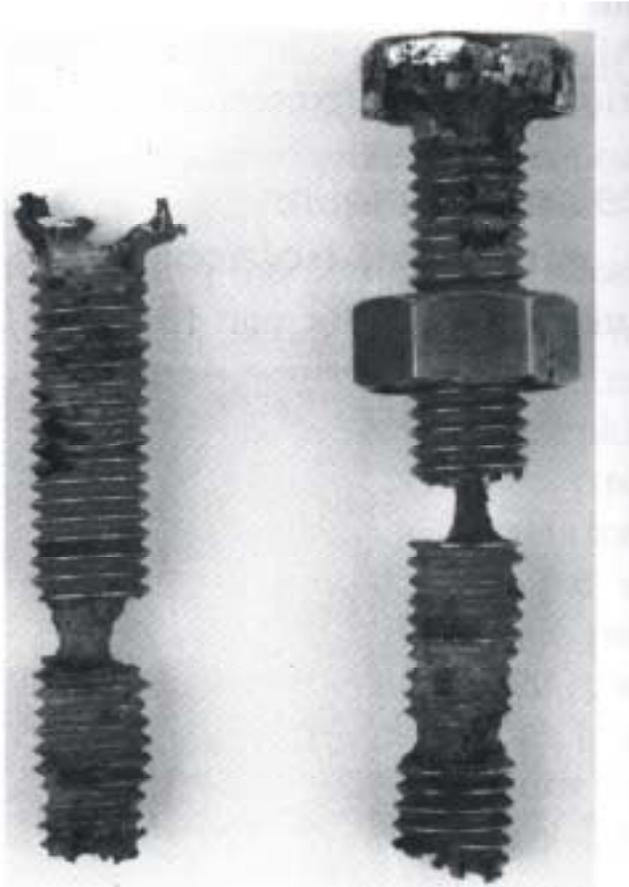


Figure V.1.2. - Corrosion caverneuse sous dépôts d'ensembles boulon/écrou en acier inoxydable austénitique à 18% Cr et 10% Ni en milieu chloruré neutre aéré.

**Attaque par hydrolyse dans des zones confinées (joints d'étanchéité, interstices entre plaques, sous des dépôts...)**

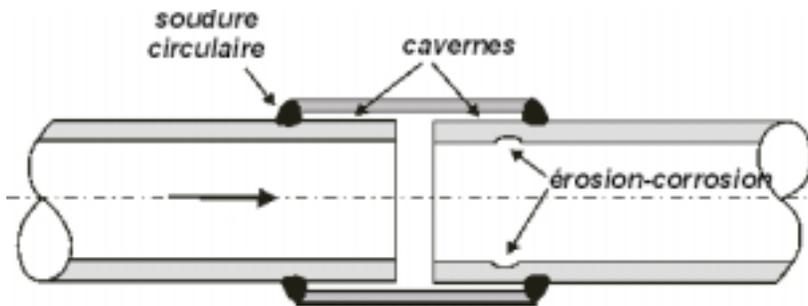
**conditions :**

- interstice étroit
- oxygène ou oxydant dissous
- anions dissous (souvent Cl<sup>-</sup>)

**→ aciers inoxydable en milieu marin**

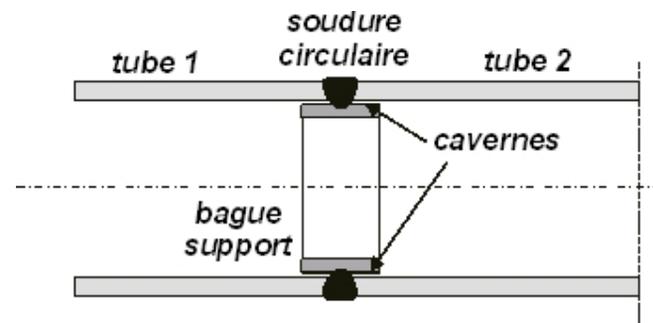
***précautions à prendre pour la réalisation de montages particuliers (soudage de canalisations)***

# Soudage entre deux tubes en acier : risque de corrosion caverneuse

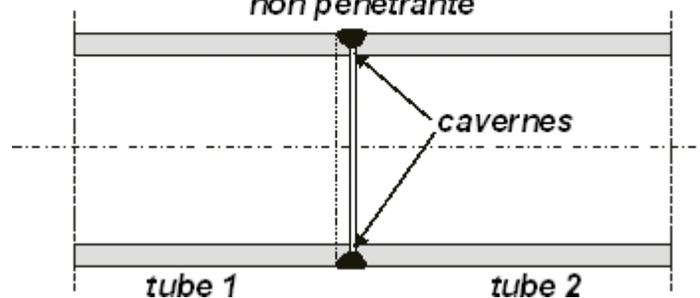


*liaison par anneau extérieur*

*liaison par anneau intérieur*

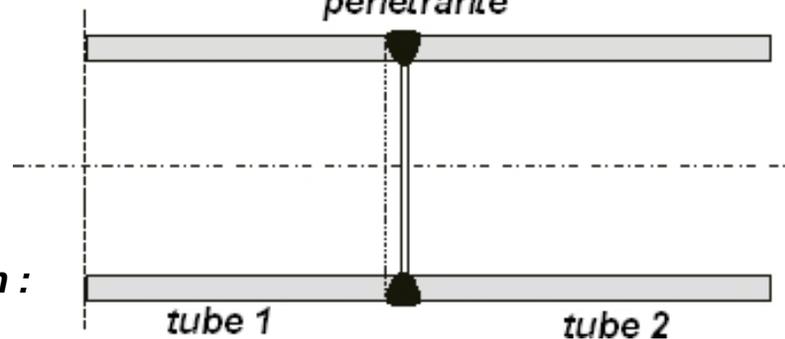


soudure circulaire non pénétrante



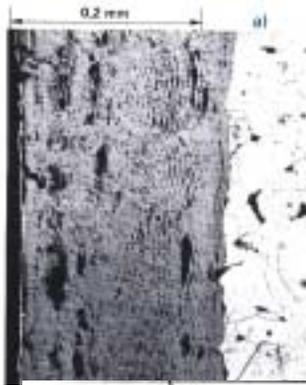
*soudure directe*

soudure circulaire pénétrante



*bonne solution :*

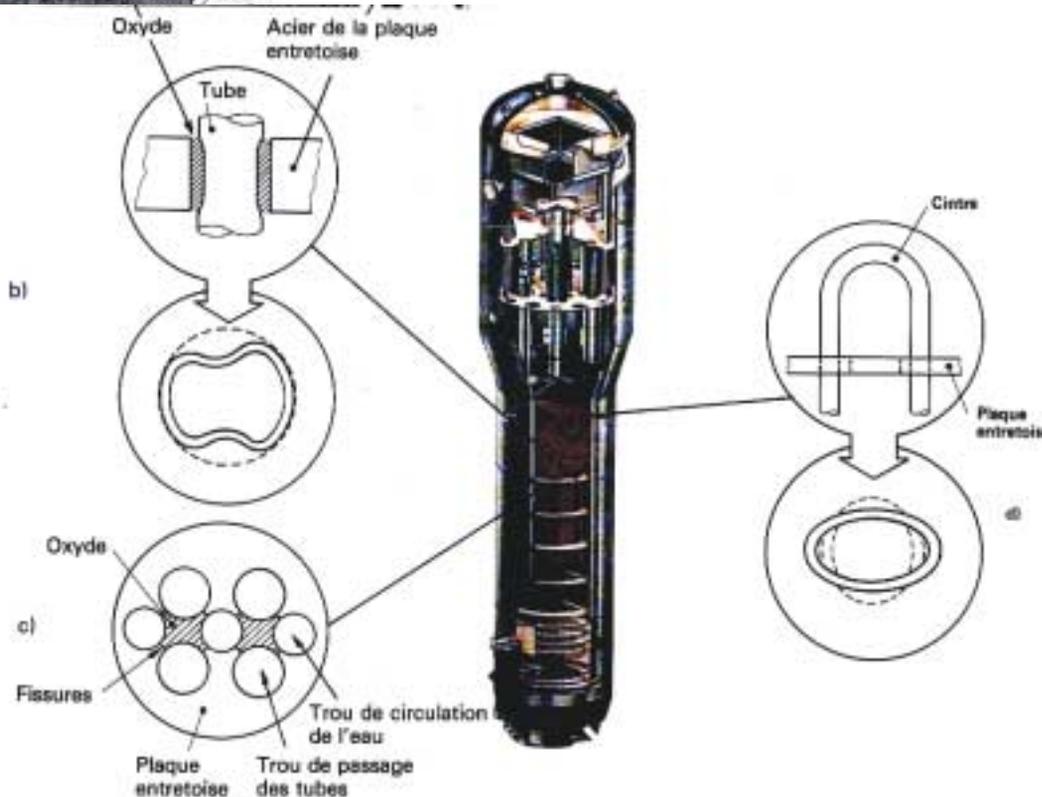
## *un exemple de corrosion caverneuse : la fissuration des tubes des GV ou « denting »*



L'étanchéité du condenseur n'est pas parfaite et il y a contamination du milieu secondaire par l'eau de refroidissement (en provenance de la mer ou de la rivière), avec enrichissement en phosphates et carbonates.

- *Le carbonate se transforme en soude et provoque la corrosion sous contrainte de l'A600.*

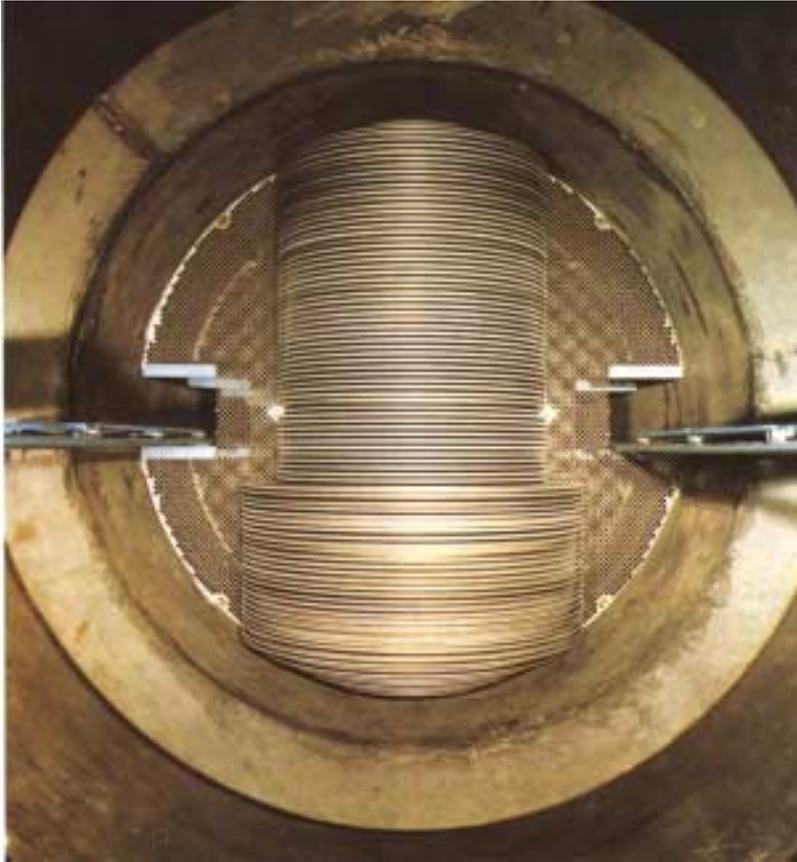
- *Les phosphates se concentrent au niveau des plaques entretoises (acier non allié) et provoque la corrosion de ces plaques.*



- remplissage de l'interstice plaque tube par l'oxyde et les sels
- développement de l'oxydation et corrosion accélérée de la plaque
- écrasement et fissuration du tube

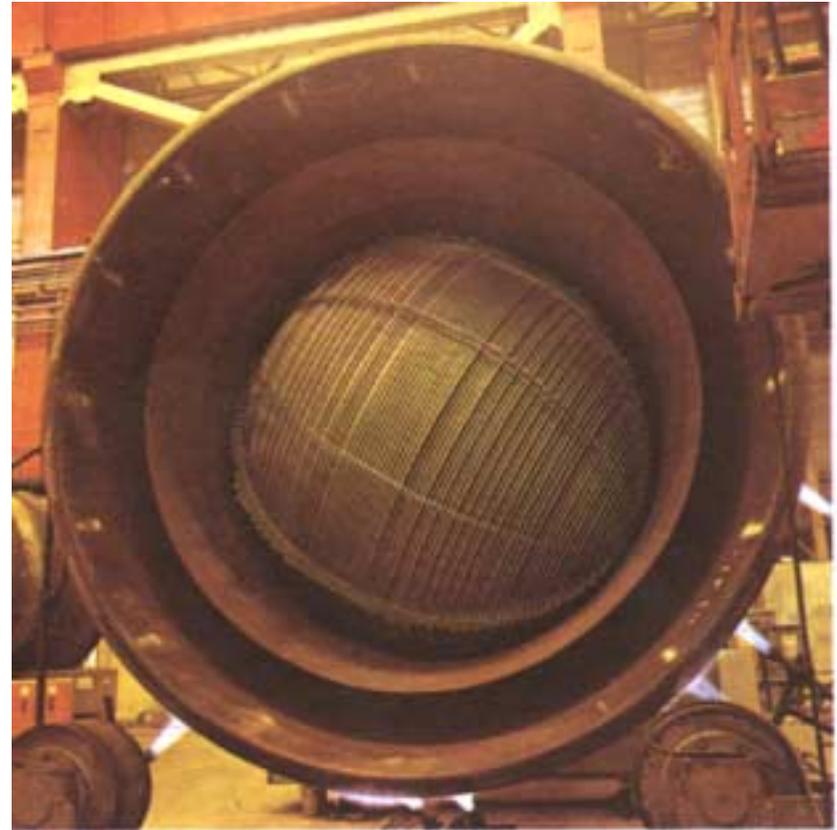
*d'où une fuite d'eau primaire (radioactive) dans le milieu secondaire ...*

## Construction d'un GV (générateur de vapeur)



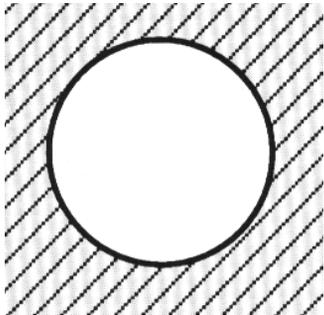
***Faisceau tubulaire en place***  
***Les tubes en partie supérieure sont écartés***  
***par des barres entretoises***

***Mise en place du faisceau tubulaire***  
***Sur la dernière plaque entretoise, on distingue des trous***  
***de gros diamètre pour le passage des tubes, et des trous***  
***de plus petit diamètre pour la circulation de l'eau.***

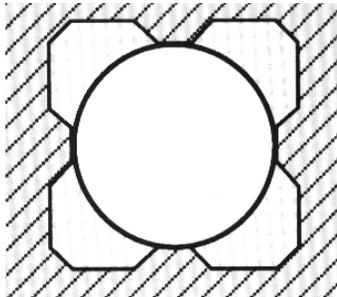


## Solutions :

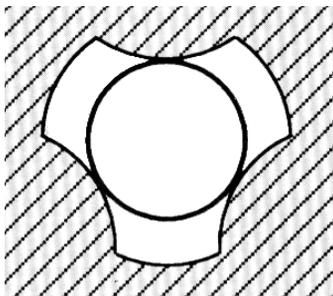
- remplacement de l'acier non-allié par un acier allié à 13%Cr plus résistant
- modification de la chimie du milieu secondaire (acide borique) pour protéger le métal de la corrosion.
- modification de la forme des trous, afin de laisser un volume suffisant à l'oxyde pour croître.



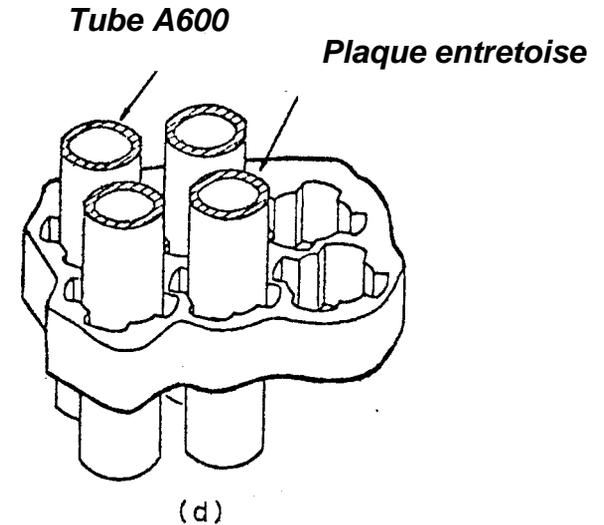
*Trou circulaire d'origine (900 MW)  
(pour tubes f 22,2 mm)*



*Trou quadrifolié 900 et 1300 MW)  
(pour tubes f 22,2 et 19,05 mm)*



*Trou trifolié (1400 MW)  
(pour tubes f 19,05 mm)*



**Pour les tubes déjà fissurés :**  
- bouchage  
- remplacement du GV

## Érosion-corrosion

Corrosion dans une canalisation due à la vitesse élevée du fluide :

- par impact de particules solides
- par impact de gouttes liquides dans la vapeur (séchage de la vapeur en aval des turbines)
- par une vitesse excessive du fluide

*exemple :*

- *les alliages cuivreux dans l'eau de mer (ils sont sensibles à des vitesses de quelques m/s)*
- *les aciers faiblement alliés : pompes alimentaires, tuyauteries de sécheurs-surchauffeurs...*

### Origine (aciers)

Un acier faiblement allié est recouvert d'une couche d'oxyde légèrement protecteur  $Fe_3O_4$  ; à l'équilibre, la vitesse de formation est égale à la vitesse de dissolution.

Lorsque la vitesse de l'eau augmente, l'oxyde se dissout plus vite qu'il ne forme et la couche s'amincit, favorisant la corrosion du métal.



Figure V.1.3. - Érosion-corrosion d'un agitateur en acier inoxydable à 20% Cr, 25% Ni, 4,5% Mo et 1,5% Cu en milieu phosphonique contenant des particules abrasives (silice et gypse) et des impuretés (chlorures et fluorures).

**L'érosion-corrosion est avant tout un phénomène de nature chimique et non une simple érosion purement mécanique !**

**La vitesse de la corrosion-érosion dépend :**

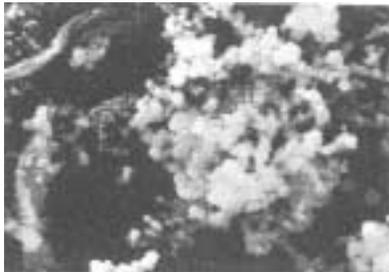
- de la vitesse de l'eau
- de la température
- du pH

## **Corrosion bactérienne**

**Modification du milieu par l'action de bactéries sulfato-réductrices qui transforment des sulfates (inoffensifs) en sulfures (agressifs)**

**formation d'un bio-film en surface du support (métal, peau, végétaux, murs...)**

- modification de l'état de surface  
(adsorption chimique de macromolécules organiques)
- adhésion des bactéries
- colonisation progressive
- développement des bactéries



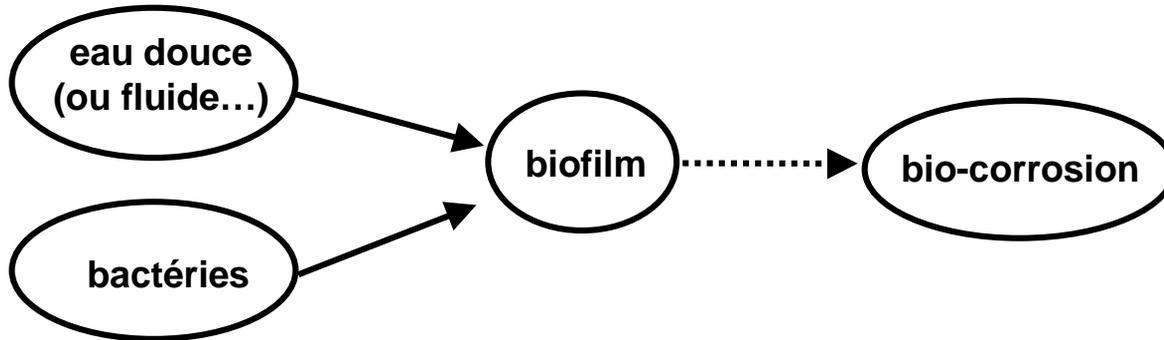
**acier au carbone (30j)**

***formation d'un biofilm  
sur une surface métallique***



**acier inoxydable (50j)**

La présence de bactéries entraîne des modifications en surface avec des réactions électrochimiques et/ou chimiques pouvant provoquer ou accélérer les processus de corrosion.



Symptômes :

- corrosion accélérée\*
- piqûres ou cavernes
- présence de bactéries dans les produits de corrosion

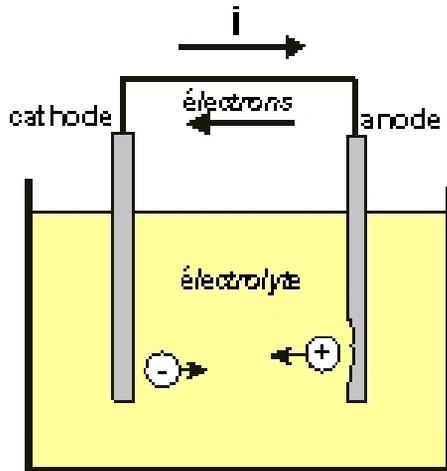
*\* dans un circuit de refroidissement, apparition en 6 mois de fissures traversantes au lieu des 30 ans de durée de vie prévues par les experts !*

**Concerne :**

- les constructions métalliques en eau de mer (plateforme)
- l'industrie du pétrole (hydrocarbures)
- l'industrie alimentaire
- les industries de traitement des eaux
- les industries chimiques
- les industries mécaniques (fluides de coupes)
- les industries aéronautiques (réservoirs de carburant)
- l'industrie nucléaire (circuit de refroidissement)

## La corrosion galvanique

due à un couplage électrique entre métaux différents dans un milieu corrosif entraînant la formation de piles électriques



**dissolution de l'anode**

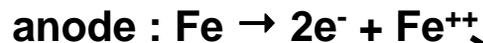
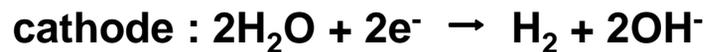
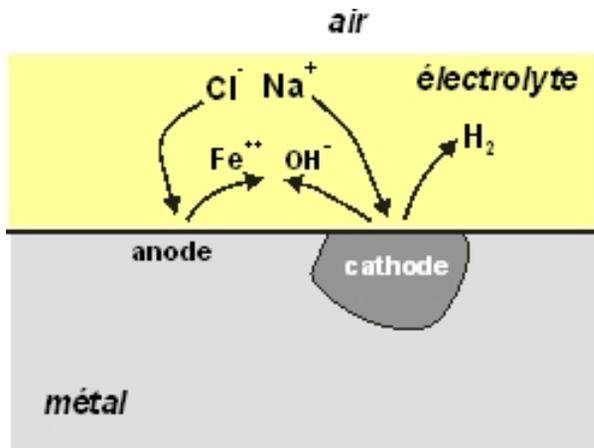
- différence de potentiel entre 2 métaux
- en contact avec un milieu aqueux (électrolyte)

*(n'apparaît pas en atmosphère sèche)*

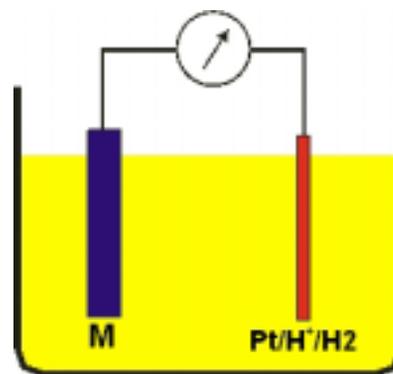
*Peut apparaître à partir d'hétérogénéités locales :*

- de constitution (composition hétérogène, précipitation...)
- de structure (microstructure fine, soudure...)
- mécanique (contrainte)
- de surface (rayures, polissage...)

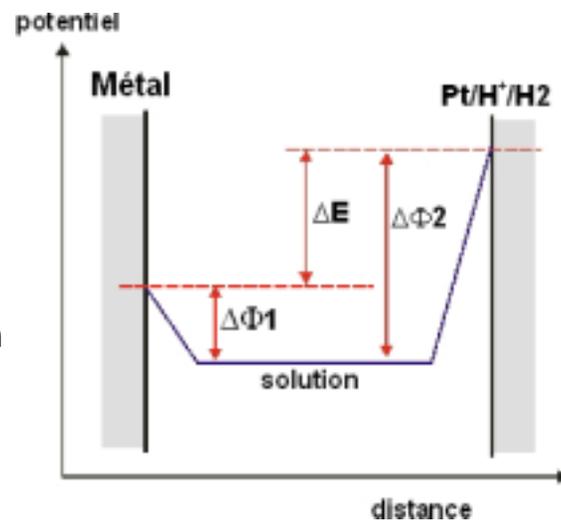
**Passivité** : formation spontanée d'une couche superficielle (oxyde ou sel) qui protège la surface du métal de la corrosion...



$\text{O}_2$  dissous

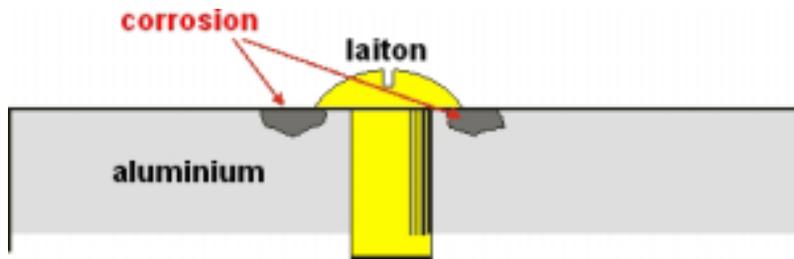


mesure du potentiel électrochimique d'un métal par rapport à une électrode de référence



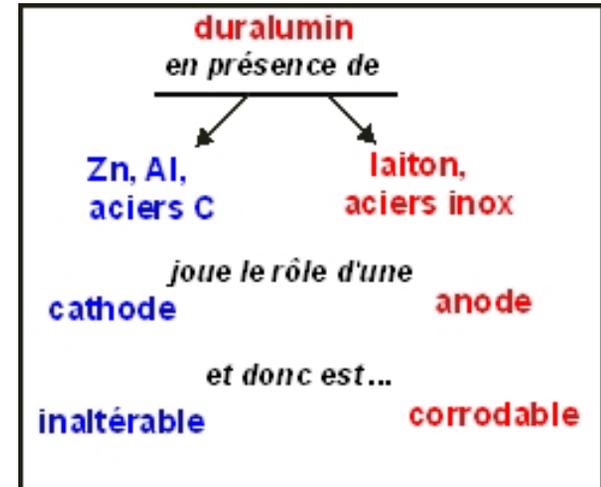
Au	+0,47	↑ tendance cathodique
Ag	+0,20	
Cu	+0,07	
H	0	-----
Ni	-0,02	↓ tendance anodique
Pb	-0,22	
Fe	-0,35 à -0,45	
Cr	-0,35	
Al	-0,48	
Zn	-0,81	
Mg	-1,35	

potentiel électrochimique  
(solution NaCl 3%)  
(mesurée par rapport à l'hydrogène)



corrosion localisée (milieu peu conducteur)

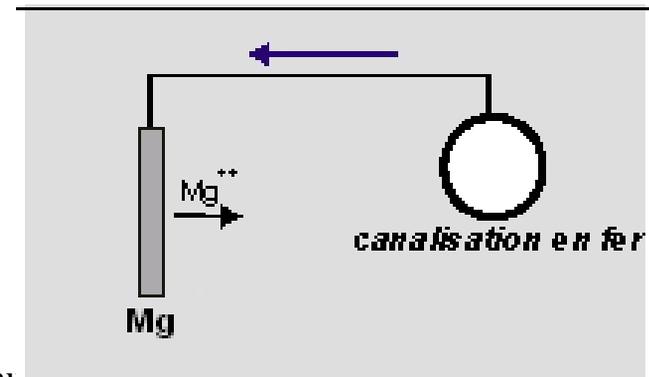
selon le type de couplage, un alliage peut être anode ou cathode... en fonction de la différence de potentiel :

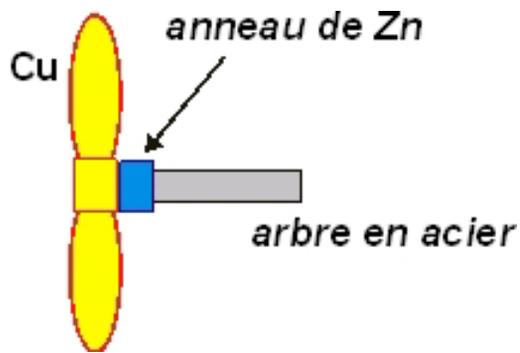


**Protection cathodique :**

Pour protéger un métal, on le couple avec un autre plus anodique :

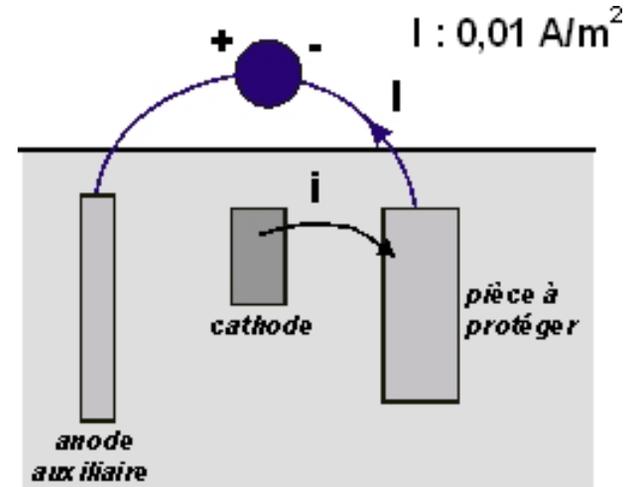
protection d'une canalisation en fer :  
couplage avec du Zn ou un alliage de Mg





Une hélice en Cu → risque de corrosion avec la coque (Fe)  
 on la protège avec un anneau proche en Zn ou Mg

On peut également utiliser une source électrique  
 entre la pièce à protéger et une anode auxiliaire  
 plus anodique  
 on utilise des vieilles ferrailles ou du graphite...



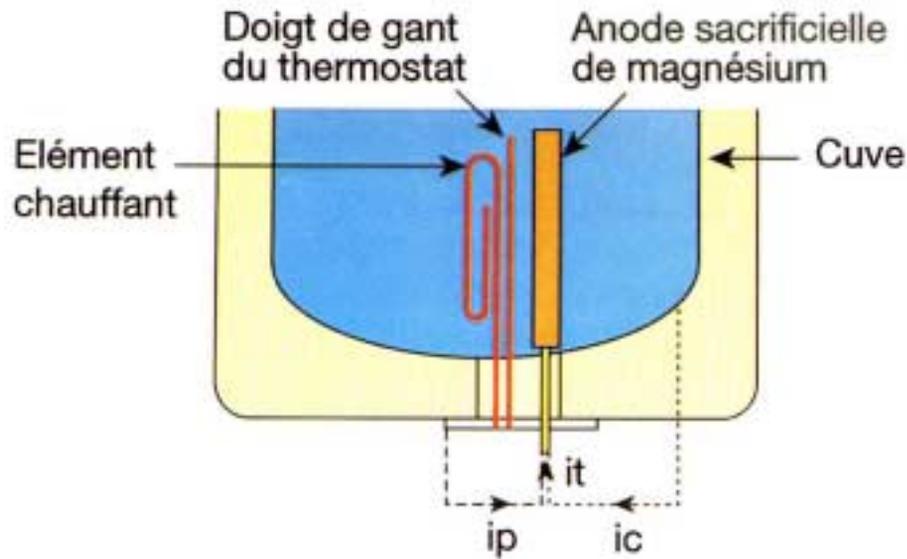
*composé insoluble qui se dépose à la surface*

**inhibiteur de corrosion**

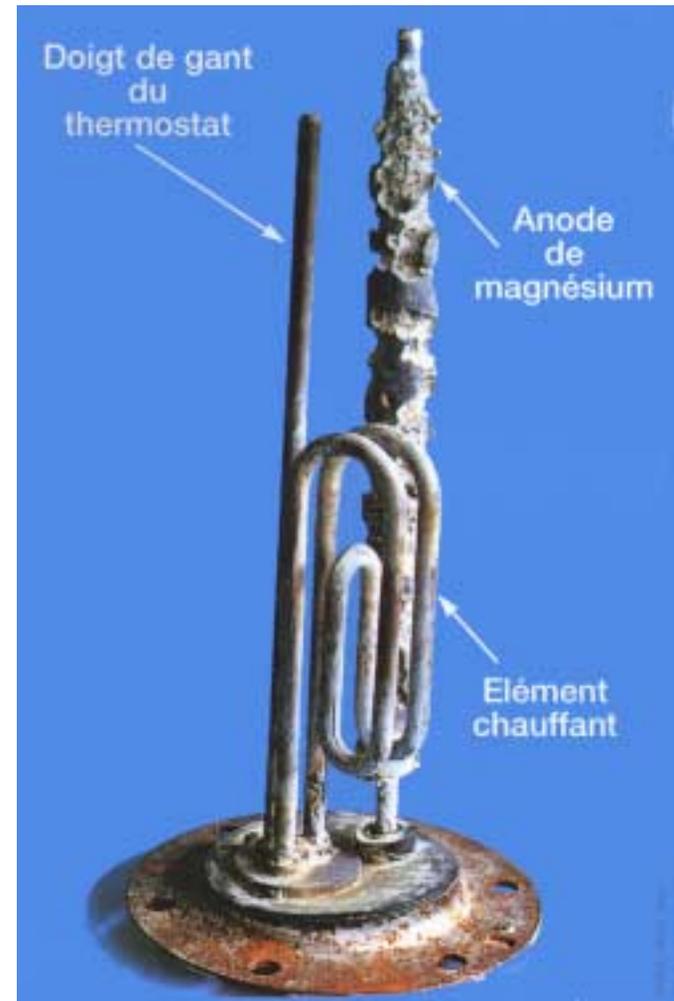
anodiques :  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{PO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{SiO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{CrO}_4$

cathodiques : sels de Mg et de Zn

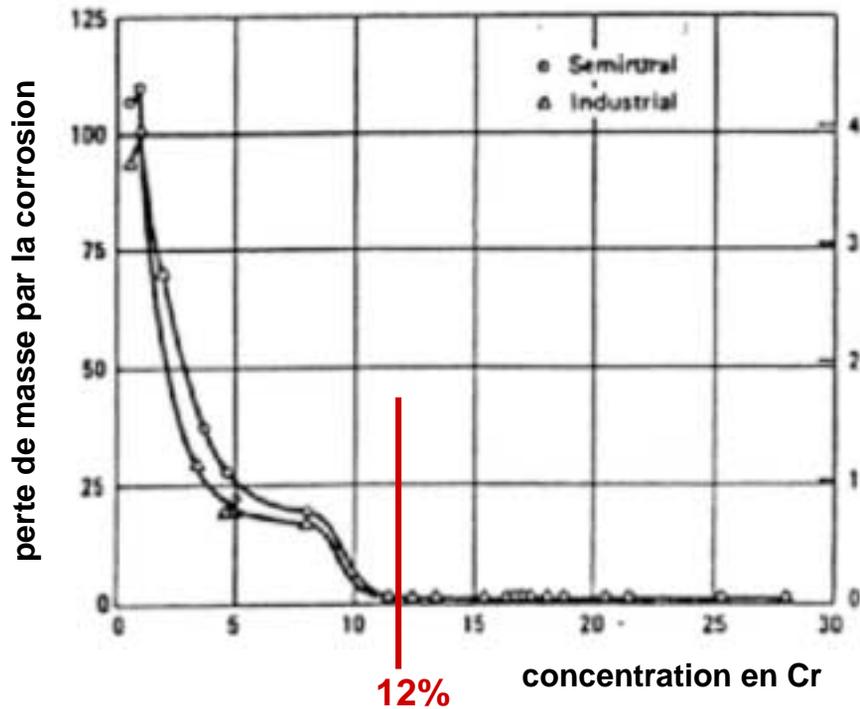
## Exemple de protection de la corrosion : chauffe-eau électrique avec anode sacrificielle



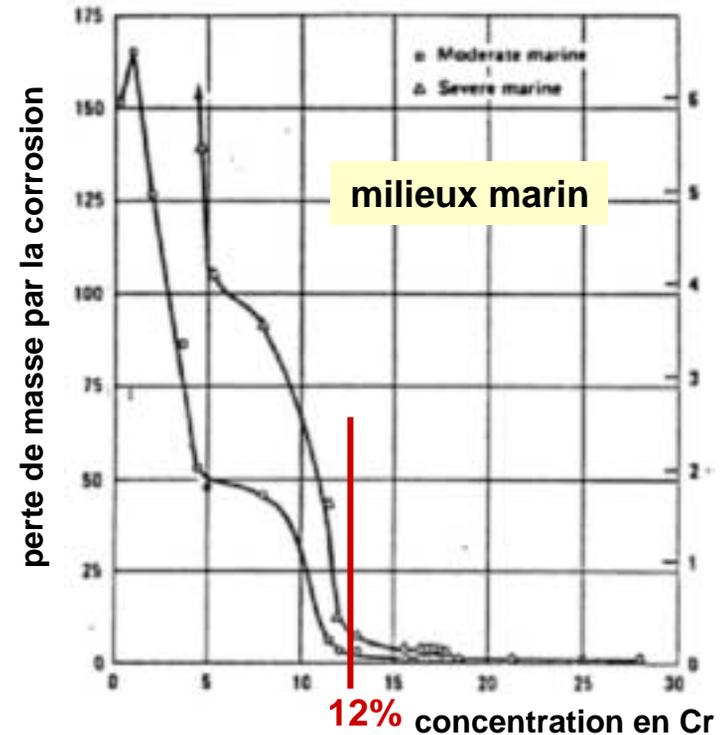
Utilisation d'une anode sacrificielle pour protéger l'élément chauffant d'un chauffe-eau



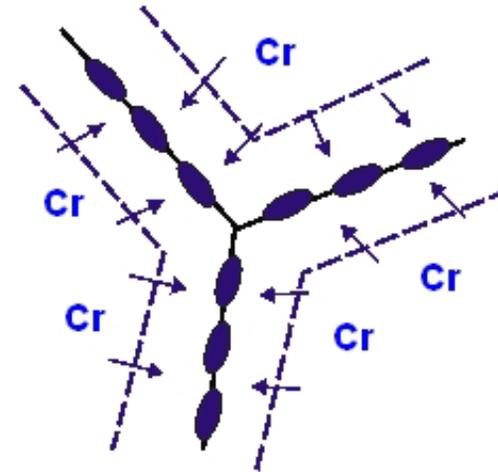
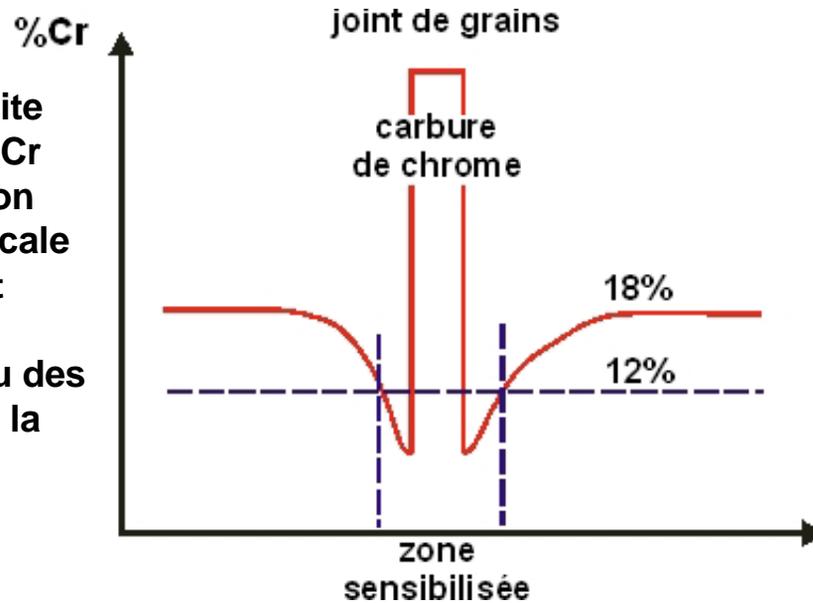
## La corrosion intercrystalline ou intergranulaire (CIG)



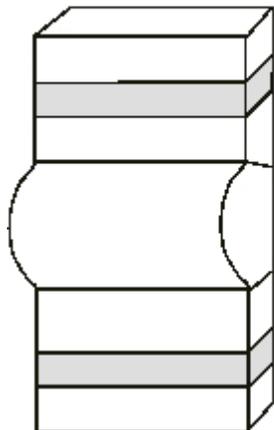
Les aciers inoxydables austénitiques sont protégés de la corrosion par une couche superficielle d'oxyde de Cr protectrice Si la teneur en Cr est supérieure à 12%



Lorsque le carbone précipite sous forme de carbure de Cr dans les joints de grains, on observe une diminution locale de la teneur en Cr qui peut devenir <12%... et rendre l'alliage sensible au niveau des joints de grains sensible à la corrosion.



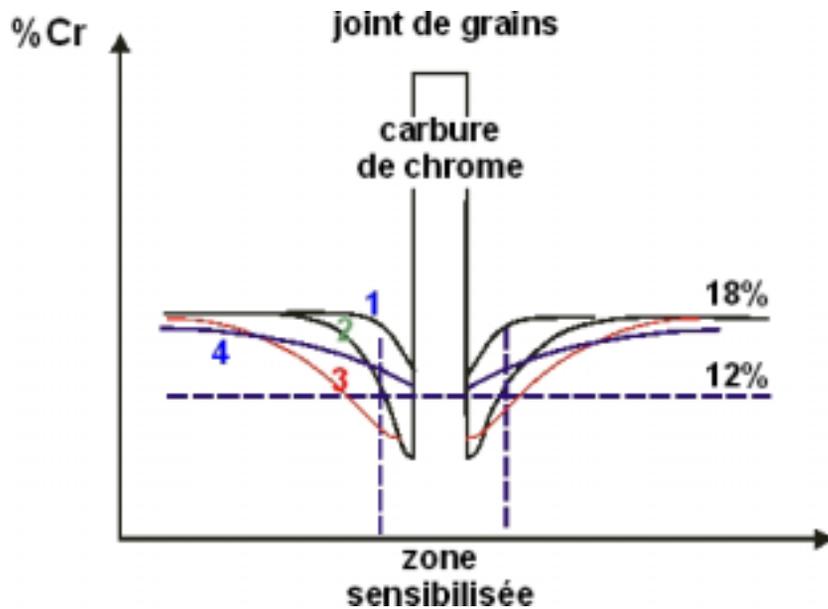
### Joint soudé



Ce phénomène peut se produire lors du soudage, dans des zones situées de part et d'autre du joint soudé...

zone sensible  
(500-800°C : précipitation de  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ )





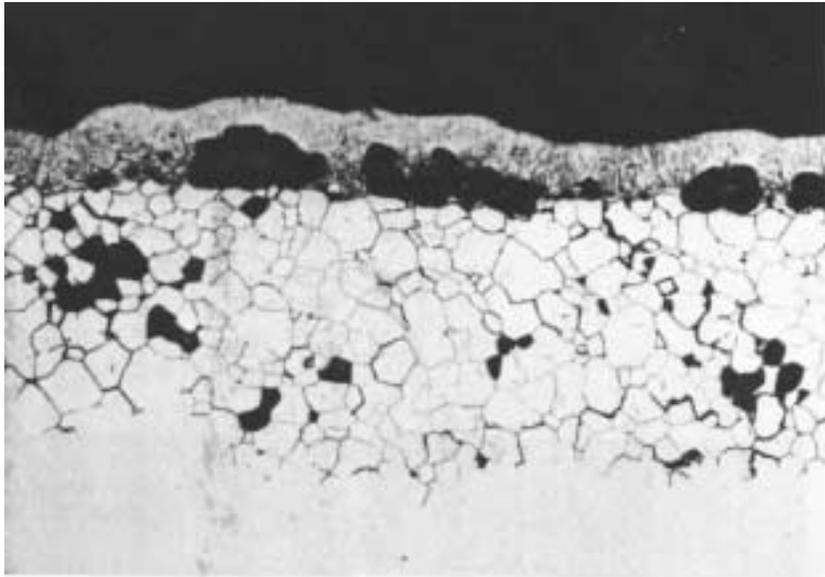
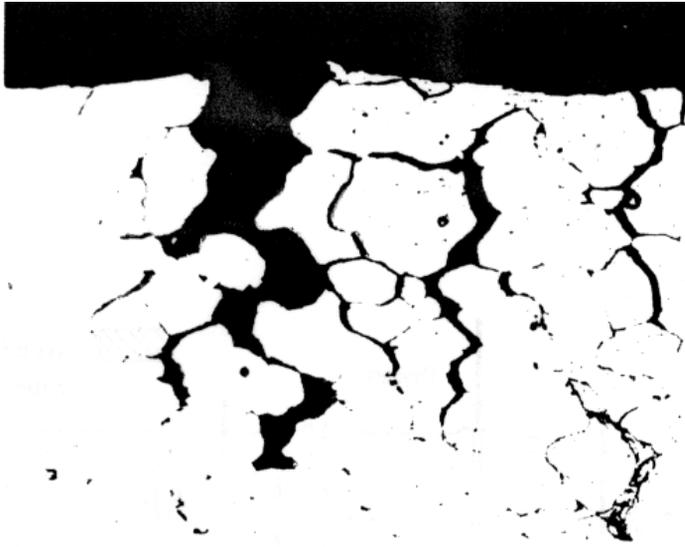
Lors d'un traitement thermique ou d'un vieillissement thermique, on observe 3 étapes (plus ou moins longues selon la température) :

**étape 1** – précipitation de carbures de Cr avec diminution de la teneur locale en Cr, favorisant la sensibilité à la corrosion intergranulaire (CIG) (courbes 1 et 2)

**étape 2** – Lorsque tout le carbone a été précipité, il y a diffusion du Cr vers le joint de grains, entraînant une diminution de la teneur en Cr à plus grande distance, mais avec une remontée au niveau du joint (courbe 3)

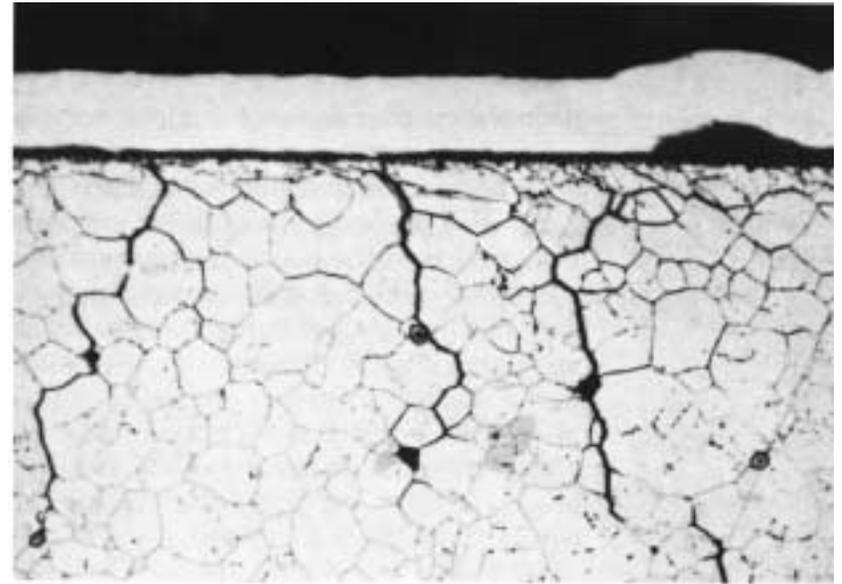
**étape 3** – Lorsque la teneur locale en Cr dépasse de nouveau 12%, insensibilisation de l'alliage à la CIG

***Lorsque une pièce en acier austénitique doit fonctionner dans des conditions de risque CIG il doit être insensibilisé au préalable par vieillissement thermique !***



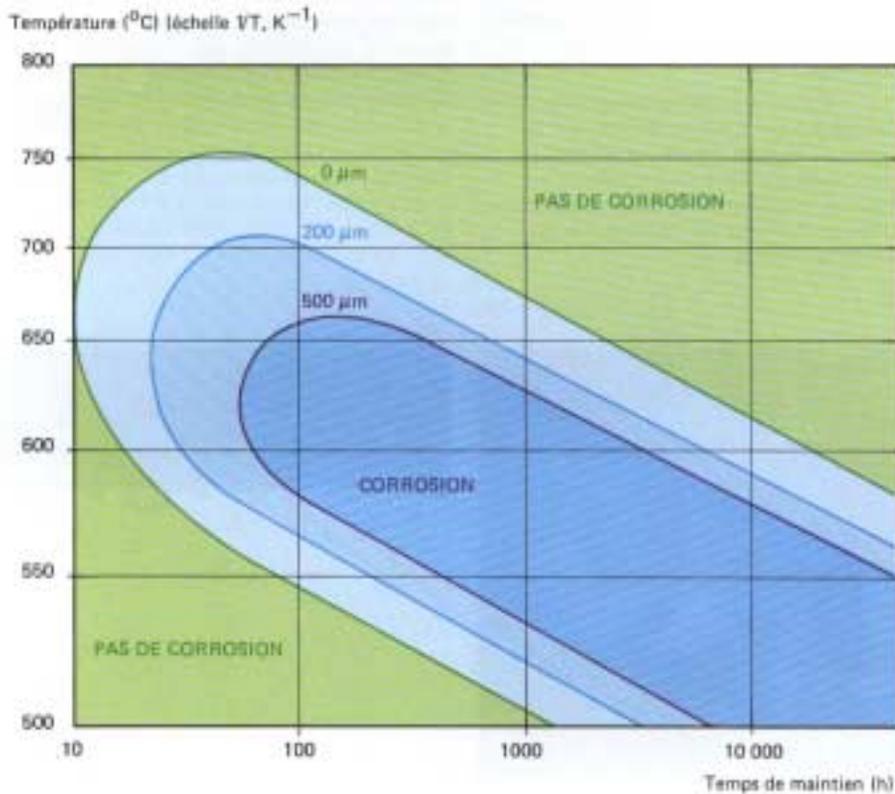
50  $\mu\text{m}$

corrosion des métaux



25  $\mu\text{m}$

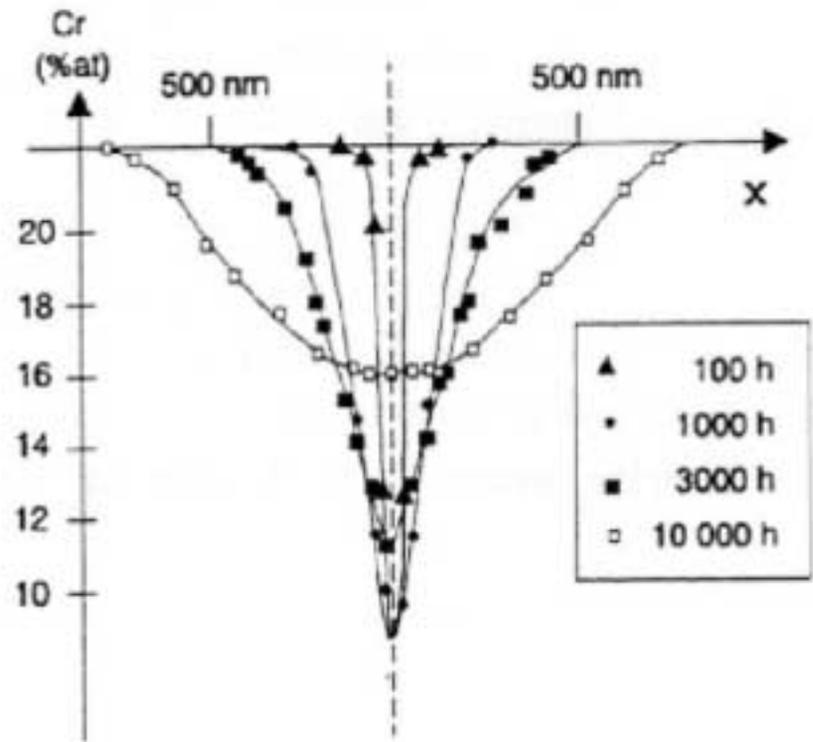
**Exemples de micrographies illustrant  
la corrosion intergranulaire**

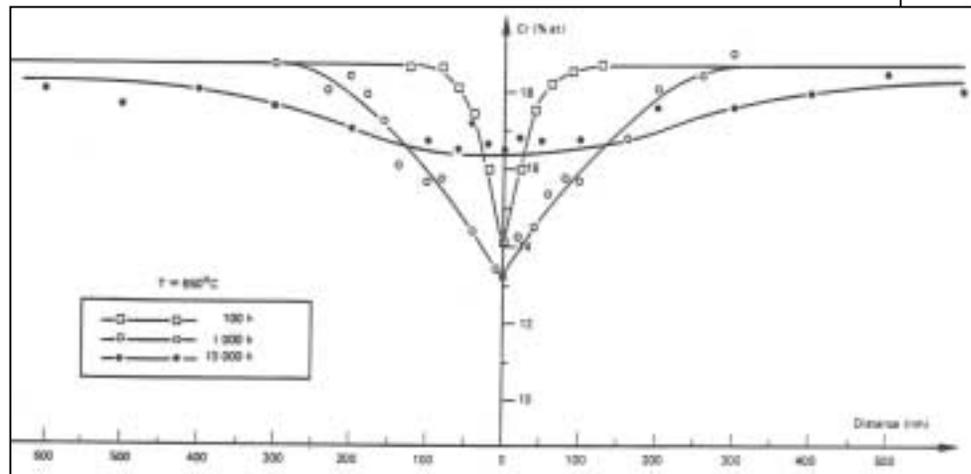
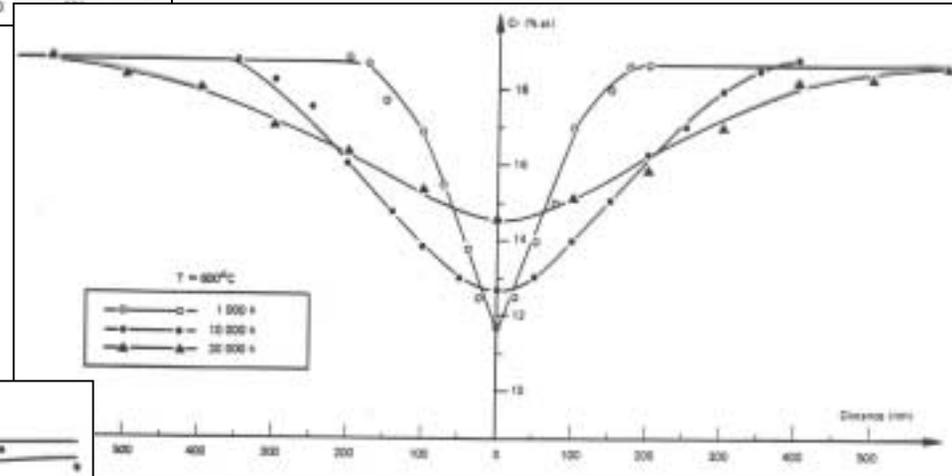
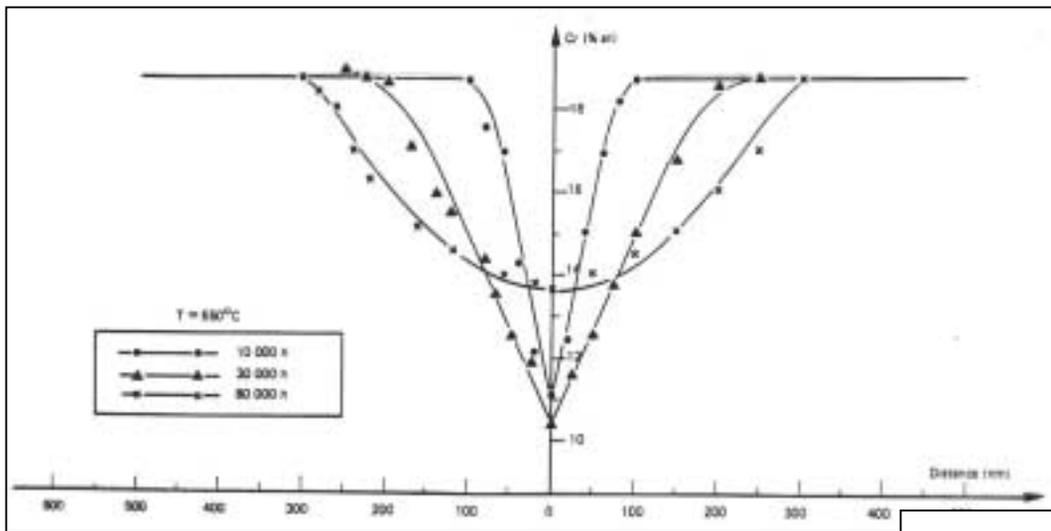


**Microanalyse en STEM :**  
gradient de concentration en Cr autour  
d'un joint de grains, pour différents  
temps de vieillissement à la température  
de  $600^{\circ}\text{C}$  :

plus de 5000 heures sont nécessaires  
pour l'insensibilisation ;  
à  $650^{\circ}\text{C}$  1000 heures devraient suffire

**Il est nécessaire de définir le domaine de  
sensibilité à la corrosion en fonction de la  
température et du temps de traitement**





## La corrosion sous contrainte (ou « sous tension »)

**SCC : Stress Corrosion Cracking**  
**IASCC : Irradiation Assisted SCC**

Corrosion généralement intergranulaire  
qui se produit lorsqu'il y a simultanément :

- présence de contraintes appliquées

- présence d'un milieu corrosif

{  
- externes  
- de soudage  
- traitement thermique...

{  
- gaz  
- électrolyte  
- sels fondus  
- métal liquide...

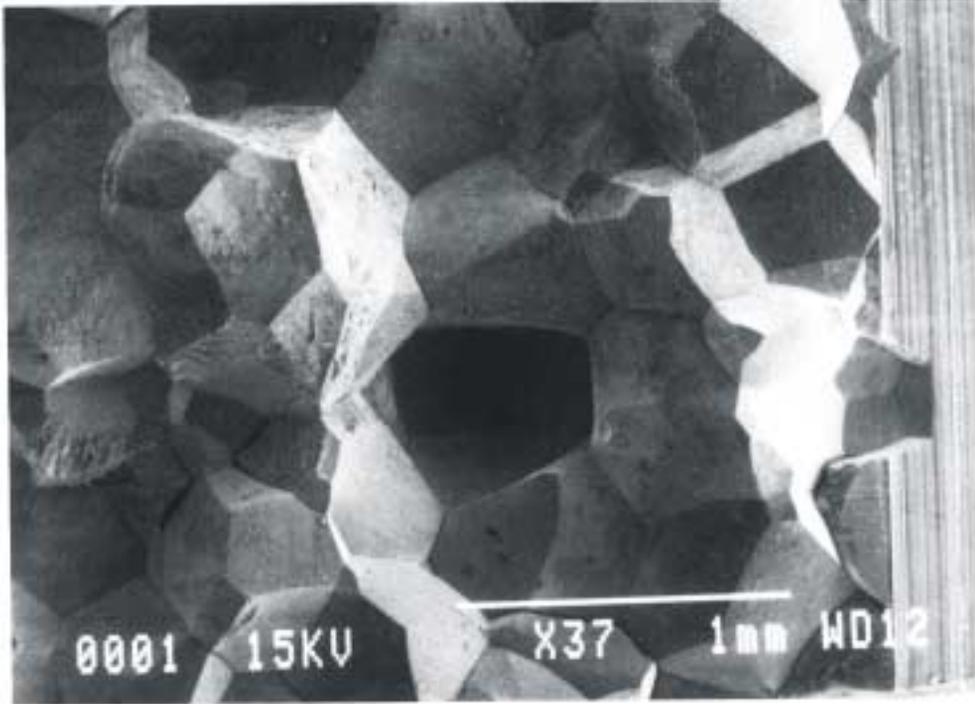
*et qui séparément n'auraient pas d'action...*

touche essentiellement les aciers inoxydables austénitiques, les alliages de Ni  
peu les ferritiques...

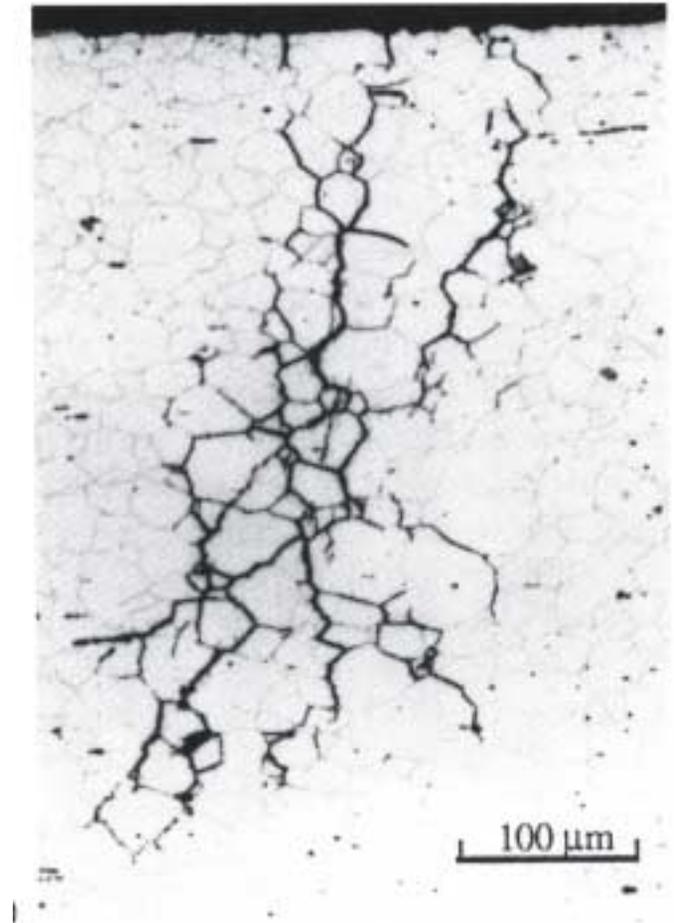
Il n'y a pas de modèles parfaitement satisfaisant !

- dépassivation mécanique par déformation plastique
- dissolution anodique du métal dépassivé
- fragilisation par l'hydrogène

→ **fissuration intergranulaire ou transgranulaire**



**Surface de rupture fragile observée par  
microscopie électronique à balayage**

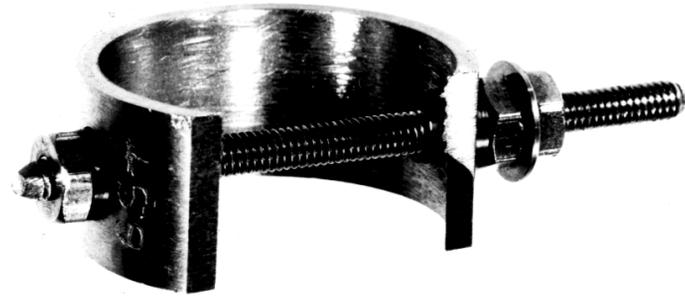


**micrographie optique**

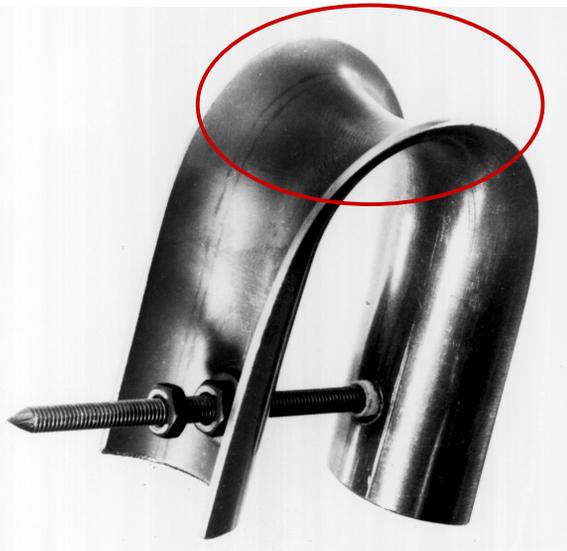
**Fissuration intergranulaire par corrosion sous contrainte  
d'un acier austénitique (Z2 NCDU 25-20) en milieu caustique à 200°C**

# Eprouvettes de test de la corrosion sous contrainte

*concentration de contraintes résiduelles*

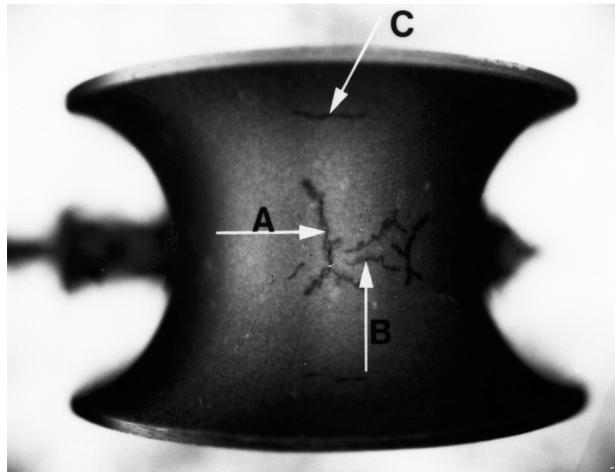


C-ring

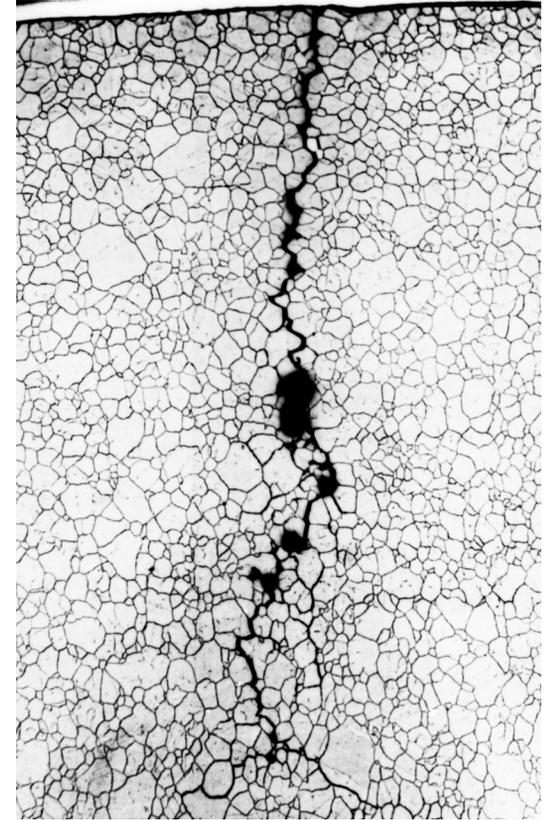


selle-de-cheval

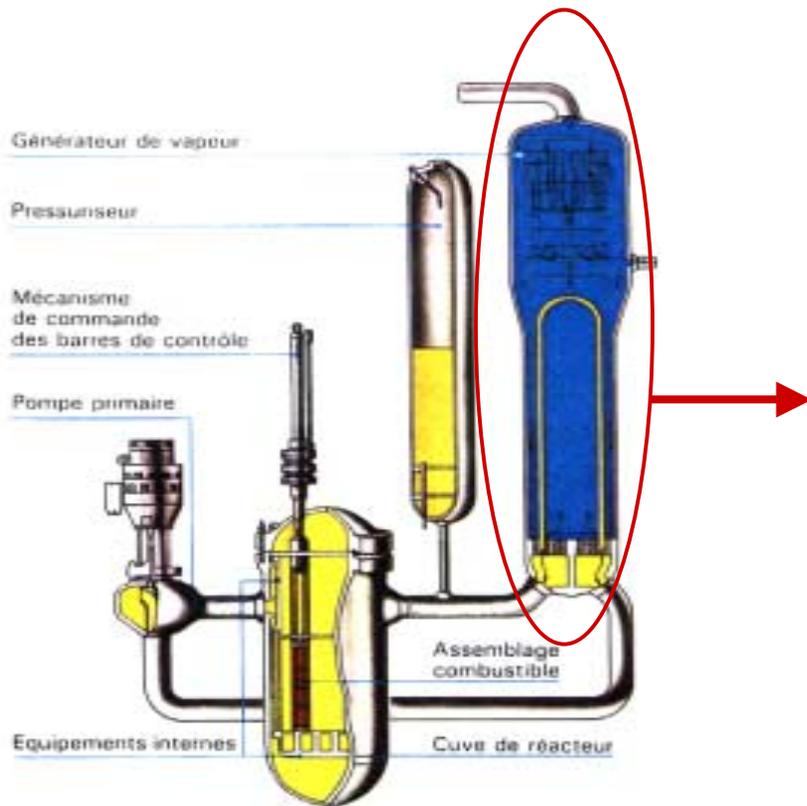
après essai :  
apparition de fissures



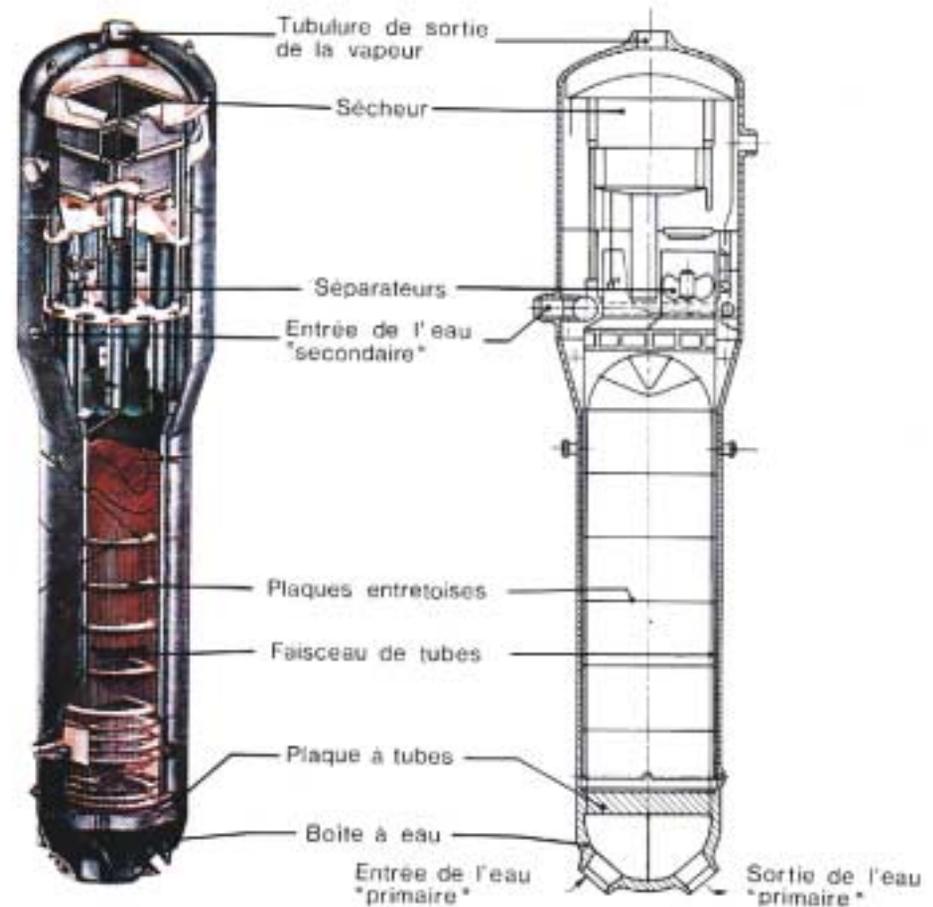
corrosion des métaux



# Un exemple de Corrosion sous contrainte : les tubes des générateurs de vapeur des REP

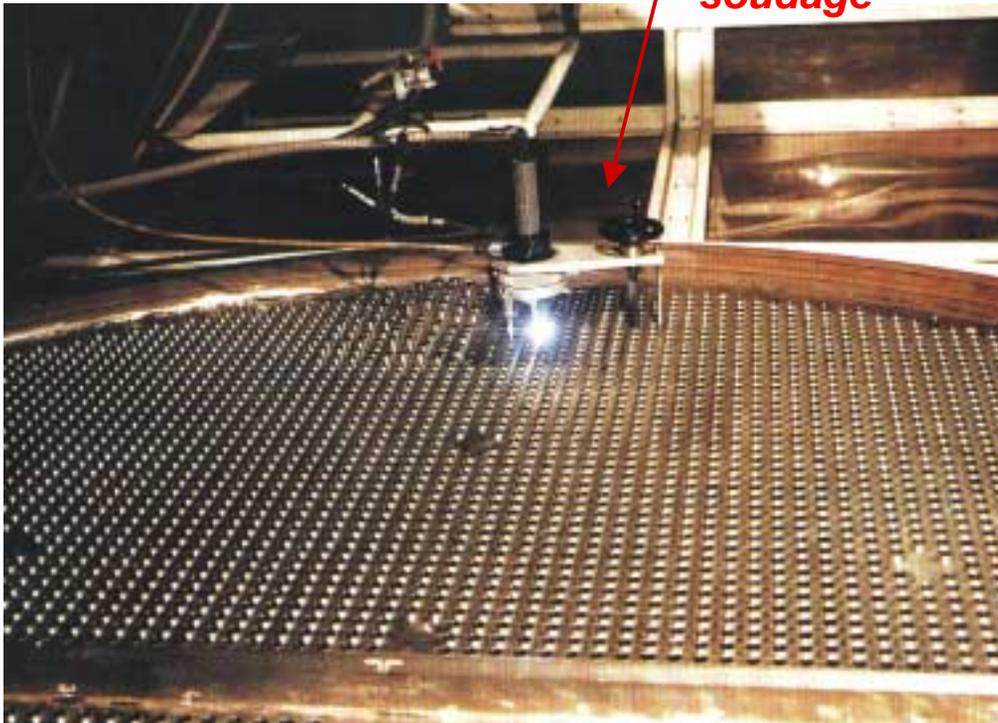
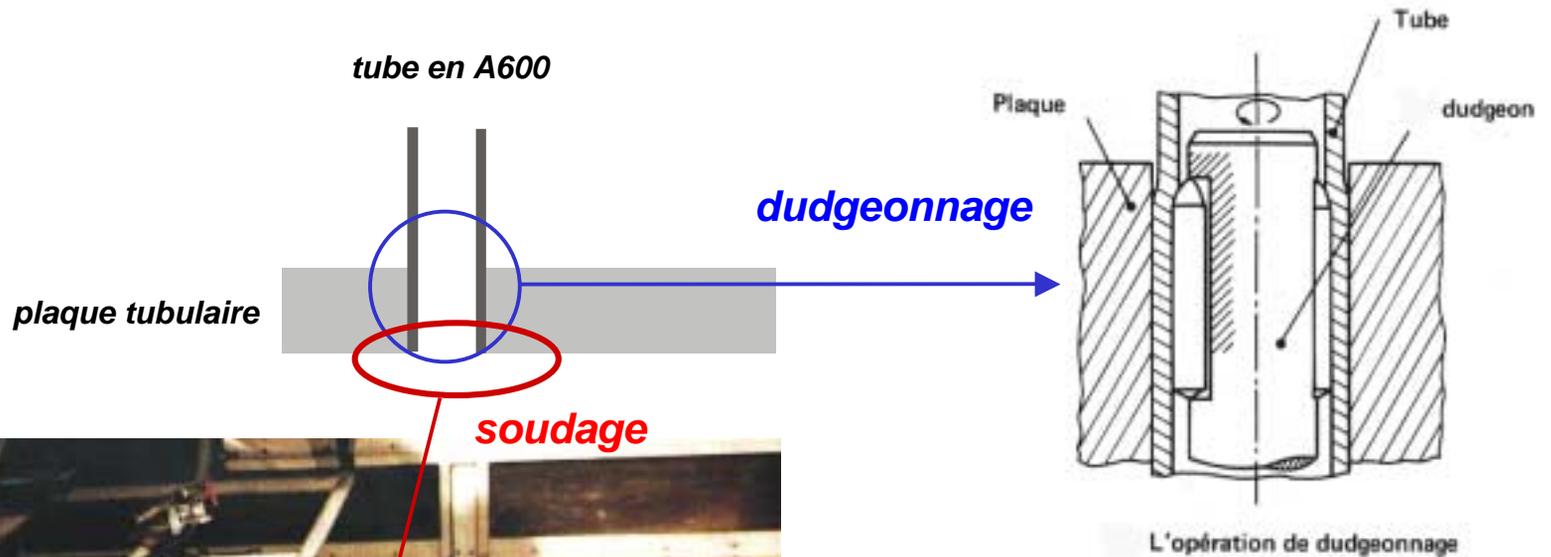


**circuit primaire**



**générateur de vapeur**

Les tubes (en alliage 600, base Ni) et où circule l'eau primaire, sont sertis par « dudgeonnage » dans la plaque tubulaire (en acier faiblement alliés du type 16MND5) puis soudés.

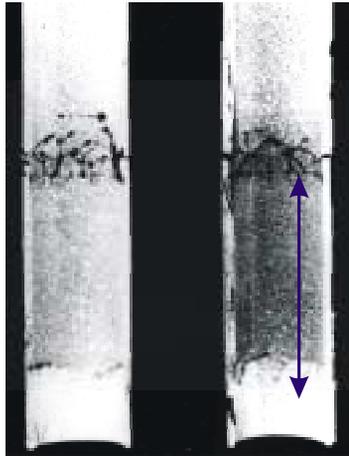


L'opération de dudgeonnage entraîne une forte déformation du métal, d'où l'apparition de très forte contraintes internes au niveau du col donné au tube.

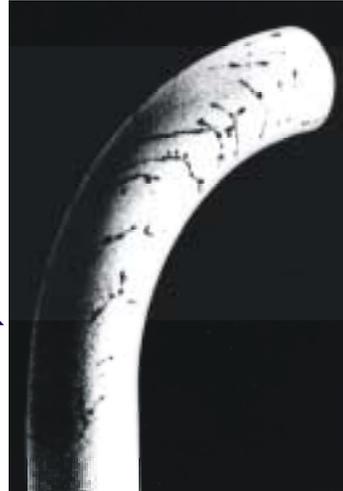
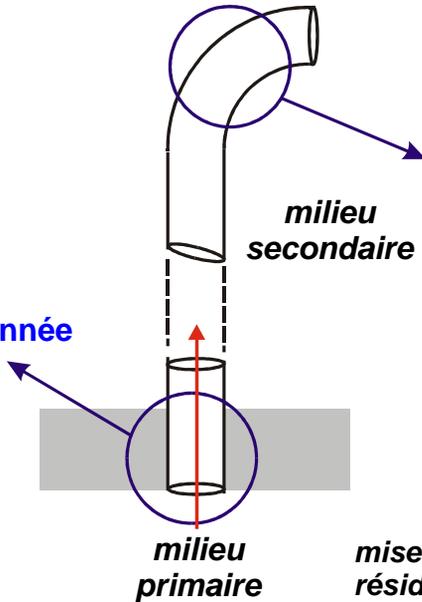
Il en est de même pour l'opération de cintrage des tubes destinées a les courber.

**zones sensibles à la corrosion sous contrainte :**

- zones dudgeonnées
- cintres

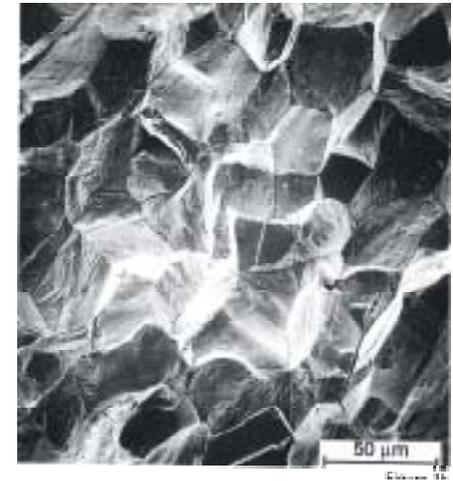


zone dudgeonnée

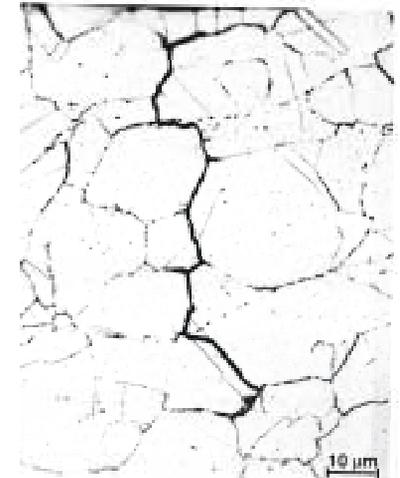


cintre

*mise en évidence des contraintes résiduelles en peau externe de tubes après essais de 24h dans du MgCl2 bouillant à 155°C*



Observation en MEB (intérieur de la fissure)



micrographie optique (fissures intergranulaires)

**Fissuration par corrosion sous contrainte de l'alliage 600 en milieu primaire (eau + lithine + acide borique + hydrogène dissous, 300°C, 155 bar)**

**La fissuration des tubes de GV peut être due :**

- du côté secondaire par une concentration d'impuretés (soude, sulfates) dans des zones confinées (corrosion caverneuse, piqûres)
- du côté primaire dans les zones contraintes (SCC)

***La SCC est responsable de près de 60% des cas d'obturation des tubes de GV dans le monde !***

**La SCC de l'alliage 600 dans l'eau pure a été observée pour la première fois en 1959 au CEA  
*résultat très controversé pendant 20 ans par les américains (utilisateurs de cet alliage dans leur réacteurs)***

**Caractéristiques de la SCC :**

- existence d'un temps d'incubation (temps à fissuration) très long (plusieurs années)

$$t_F = \frac{k}{\sigma^4} \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right)$$

**A600 dans l'eau pur :**

$$\sigma > R_{p0.2}$$

**Q de l'ordre de 180 kJ/mol**

- existence possible d'un seuil de contrainte

***La SCC apparaît toujours pour des contraintes supérieures à la limite élastique...  
mais est-ce en raison d'un temps d'incubation trop grand pour de faibles contraintes ?***

## Paramètres influençant la SCC

- contrainte et vitesse de déformation

*la contrainte modifie le temps à fissuration (incubation) mais le paramètre important serait la vitesse de déformation et plus particulièrement la vitesse de déformation locale aux joints de grains*

- milieu

*eau pure ou caustique (modifie le temps à fissuration)*

- hydrogène

*milieu primaire des REP*

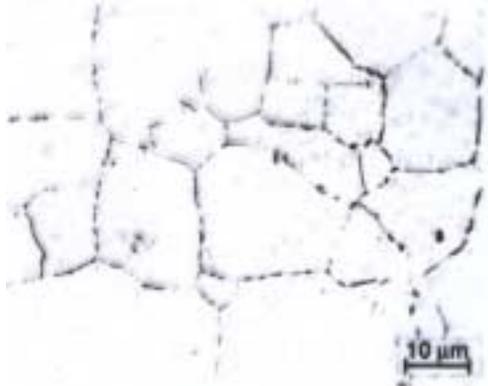
*rôle très néfaste*

*diminue le temps à fissuration en milieu primaire*

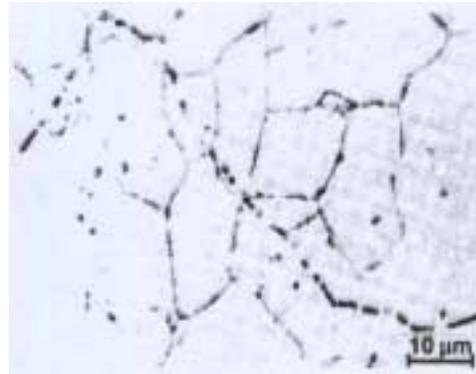
*mais assez complexe en milieu caustique*

- microstructure

***la sensibilité à la SCC est plus forte lorsque les carbures sont intra (ou trans) granulaire***



**précipitations  
de carbures  
intergranulaires**



**précipitations  
intergranulaires  
et intragranulaires faibles  
(ancien réseau de grains)**



**fortes précipitations  
de carbures  
intragranulaires**

**alliage 600**

***augmentation de la sensibilité à la SCC*** →

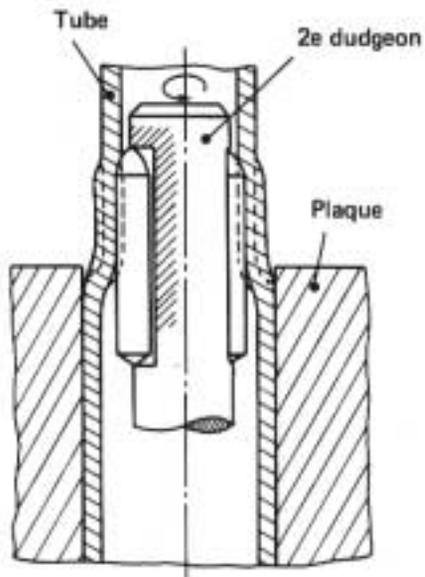
***un revenu de 1h à 700°C de l'A600 permet une précipitation de Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub> aux joints de grains (sans précipitation transgranulaire)***

## tubes non fissurés

### - traitement thermique des cintres

Un traitement thermique 12h-700°C, permet de réduire le niveau des contraintes résiduelles (<50 MPa)

### - modifier le dudgeonnage



Le Dudgeonnage Amélioré Mécaniquement

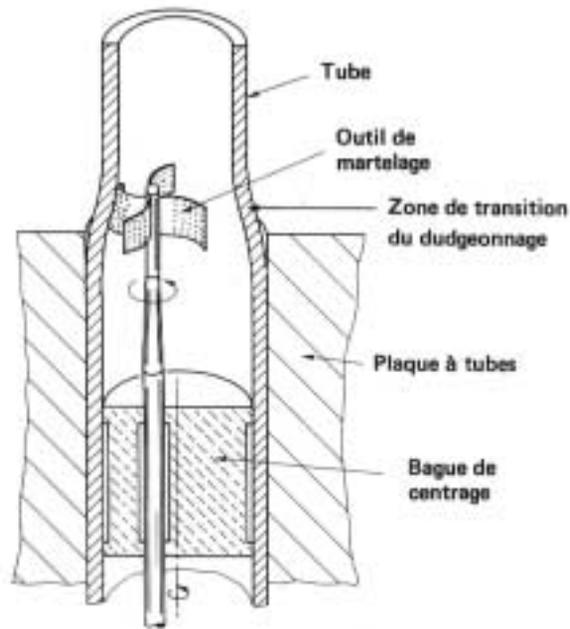
Le dudgeonnage amélioré mécaniquement (DAM) permet de réduire les contraintes de tension en surface externe du tube.

En face interne il modifie la distribution des contraintes limitant les risques de fissuration circumférentielles.

*insuffisant pour éliminer tout risque de corrosion*

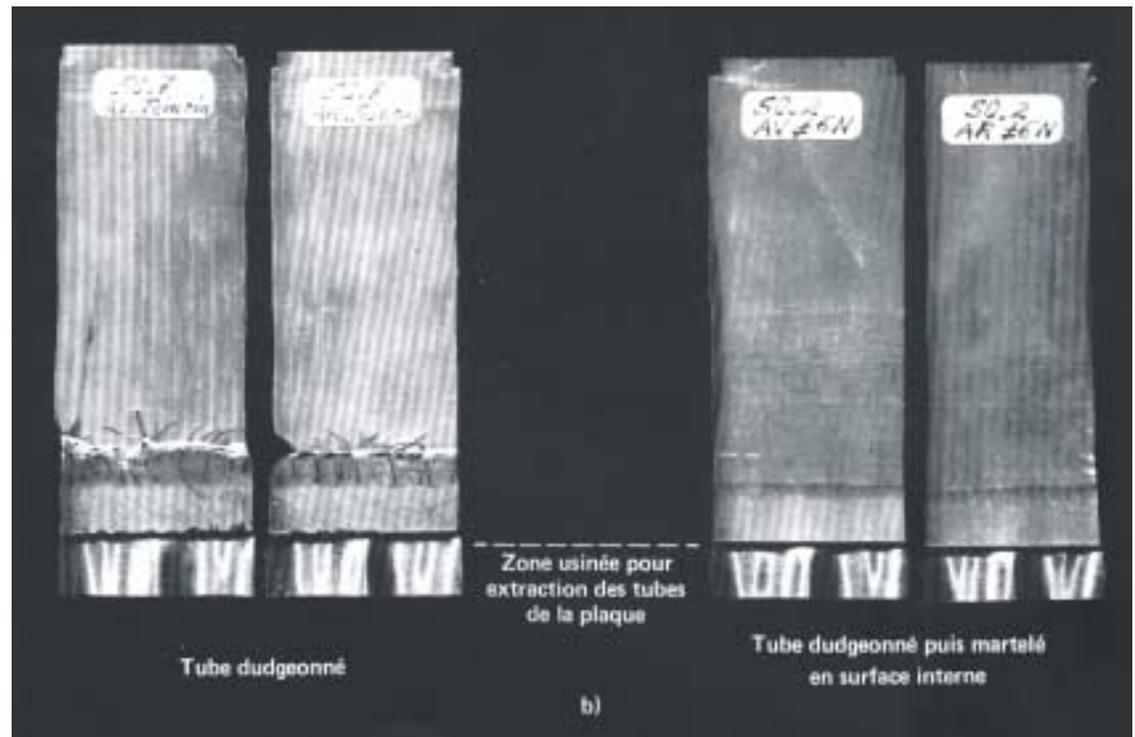
- détensionner le tube après dudgeonnage

*(introduire de contraintes de compression)*



On introduit à l'aide d'une brosse tournante portant des billes de grenailage, une petite déformation diamétralement opposée à la zone de contraintes, d'où une relaxation locale des contraintes,

- grenailage (ou micromartelage)



- changer l'alliage

*alliage 690 sur les REP français (palier N4\*), A800 sur les REP allemands*

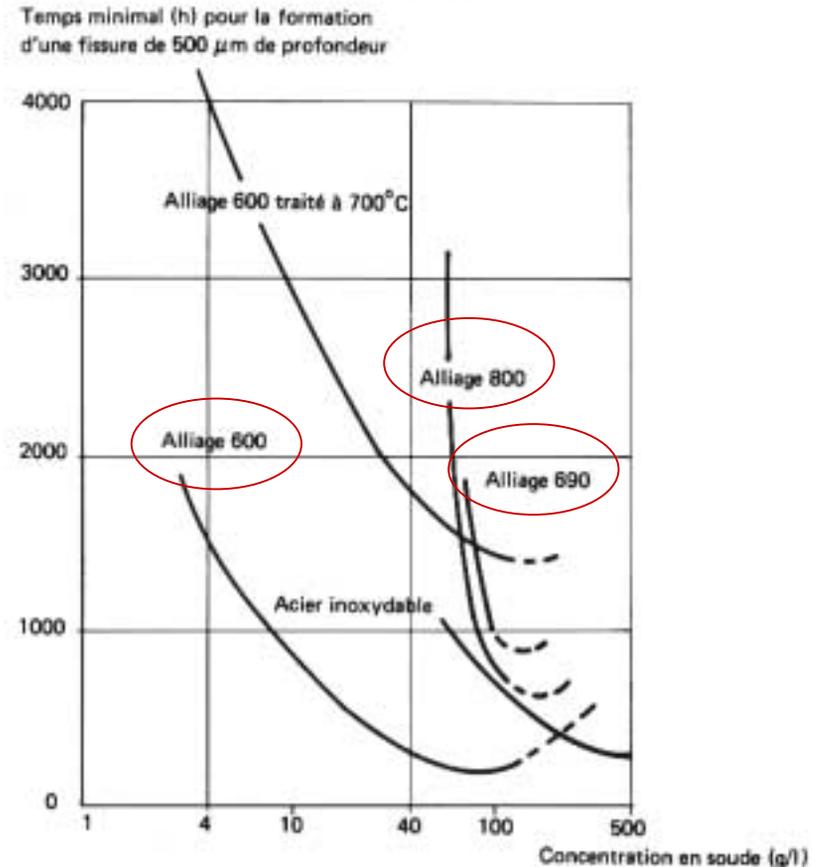
	Cr	Ni	Fe
A600 (NC15Fe)	16	74	8
A690 (NC30Fe)	29	60	9
A800 (Z2NC34-22)	21	33	43

\* palier N4 : Chooz 1 & 2, Civeaux 1 & 2

*temps minimum (h) pour la formation d'une fissure de 500  $\mu\text{m}$  de profondeur en fonction de la concentration en soude pour différentes nuances d'alliage*

tubes fissurés

- on les bouche
- on change le GV...

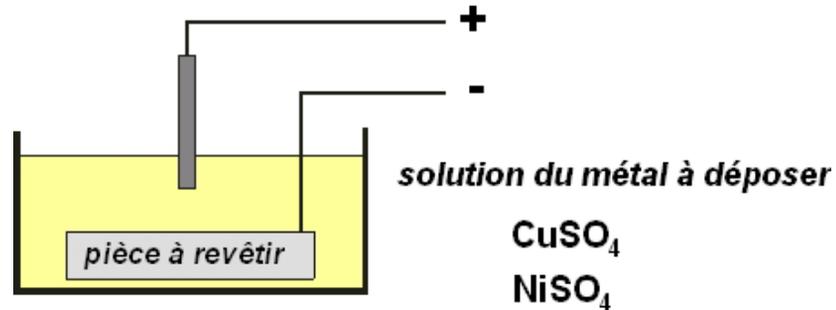


# Protection contre la corrosion

## 1) Revêtements superficiels métalliques

### a) Electrolyse

dépôt de Cu, Ni, Cr, Sn, Zn, Cd



*Il est quelquefois nécessaire de faire une sous-couche préalable pour favoriser l'adhésion*



### b) Bain métallique

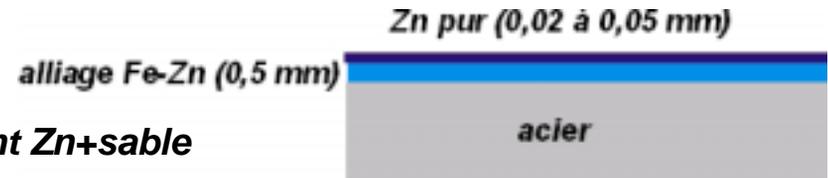
- galvanisation (dépôt de Zn)
- étamage (dépôt d'étain)(fer « blanc »)

### c) cémentation

sens élargi (pas uniquement avec le carbone) : revêtement obtenu par diffusion

- shéardisation : protection par dépôt de Zn

*chauffage à 350°C dans un ciment Zn+sable*



- calorisation : *protection par de l'Al*
- chromisation : *protection par du Cr*
- siliciuration : *protection par du Si*

### 2) Revêtements superficiels non-métalliques

- phosphatation : *phosphate di-acide de Mn, Zn, Na...*
- oxydation anodique : patines, bronzages...
- émaillage : *borosilicates de Ca, Na, K ...*
- peintures, laques, vernis...

### 3) Utilisation de métaux et alliages résistants à la corrosion

*de préférence sous forme de solutions solides homogènes...*

métaux purs

- Pt, Ta, W : naturellement inoxydables
- Pb, Ni ... selon le type de corrosion

**! attention aux faibles caractéristiques mécaniques**

aciers

incorporation de Cr pour former une couche superficielle compacte adhérente et protectrice

→ **aciers inoxydables**

-aciers martensitiques (Cr 13%) : bonne limite élastique  
*lames de couteaux, aubes de turbines, arbres de pompe...*

-aciers ferritiques (Cr 17% C>0,1%) (résiste à l'acide nitrique)  
*industrie alimentaire...*

- aciers au Cr-Ni {  
- « 18-10 » (austénitiques)  
*industries chimique et alimentaire, ameublement, décoration...*  
- « 18-10 » au Mo  
- austéno-ferritiques (corrosion sous tension, milieu sulfurique)  
- aciers au Cr-Mn-Ni (18% 7% 5%) moins chers mais moins résistants...

alliages riches en Ni