

## LA CORROSION SOUS CONTRAINTE (CSC) :

### 1 - Définition:

La corrosion sous contrainte résulte de **l'action conjuguée** d'une contrainte mécanique de tension **et** d'un milieu corrosif généralement aqueux, chacun de ces facteurs pris séparément n'étant pas susceptible à lui seul d'endommager le matériau ou la structure.



*Corrosion sous contrainte d'un tube en acier inoxydable en présence de quelques ppm de chlorures*

La CSC se produit en règle générale au contact de milieux peu ou pas agressifs à l'égard de l'alliage en l'absence de toute contrainte (*cas de la CSC des aciers inoxydables en présence de vapeur à haute température*).

Les pertes en poids (perte de matière) sont généralement très faibles.

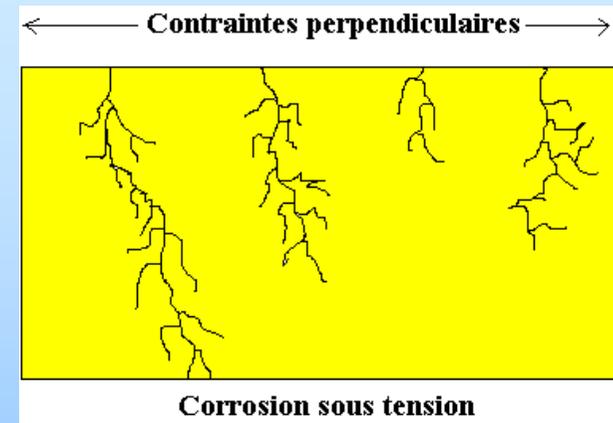
On ne connaît pas de métaux ou d'alliages commerciaux qui soient insensible à la CSC. Des matériaux comme le verre, les matières plastiques, le caoutchouc sont aussi sujets, dans certaines conditions, à cette forme de corrosion.

# COURS ENSITM

La corrosion sous contrainte se caractérise par l'apparition de fissures dont la propagation est perpendiculaire à la contrainte.

Les fissures sont initiées, la plus part du temps, par des défauts de surfaces (souvent des piqûres de corrosion)

Le temps nécessaire à la rupture d'une pièce par corrosion sous contrainte peut varier de quelques minutes à quelques années.



*Effondrement d'un faux plafond d'une piscine couverte communale, fixé par des tirants en acier inoxydable*

*Tirant rompu en acier inoxydable 304L*



# COURS ENSITM

---

## 2 – Nature des contraintes :

Les contraintes de tension peuvent être de nature très diverses :

- ❑ **Contrainte de service** : *par exemple, variation de pression (autoclave), contraintes thermiques (dilatation),...*
- ❑ **Contraintes dues au mode d'assemblage** : *rivetage, sertissage, filetage, brasage mais surtout soudage,...*
- ❑ **Contraintes dues aux procédés d'élaboration ou de mise en forme** : *forgeage, laminage, étirage, emboutissage, torsion, pliage, dudgeonnage, usinage,...*
- ❑ **Contraintes « internes » dues à des transformations métallurgiques de phases** : *par exemple austénite ( $\gamma$  - cubique face centrée)  $\rightarrow$  ferrite ( $\alpha$  - cubique centré) ou martensite)*

D'une manière générale, les risques de CSC ne sont sensibles qu'à partir d'un seuil de contraintes déterminé dont la valeur est fonction **du métal et du milieu**. Des cas de CSC ont été observés avec des alliages ne travaillant qu'à 10% de leur limite élastique.

**Toutefois les risques deviennent notable qu'à partir de 70%.**

# COURS ENSITM

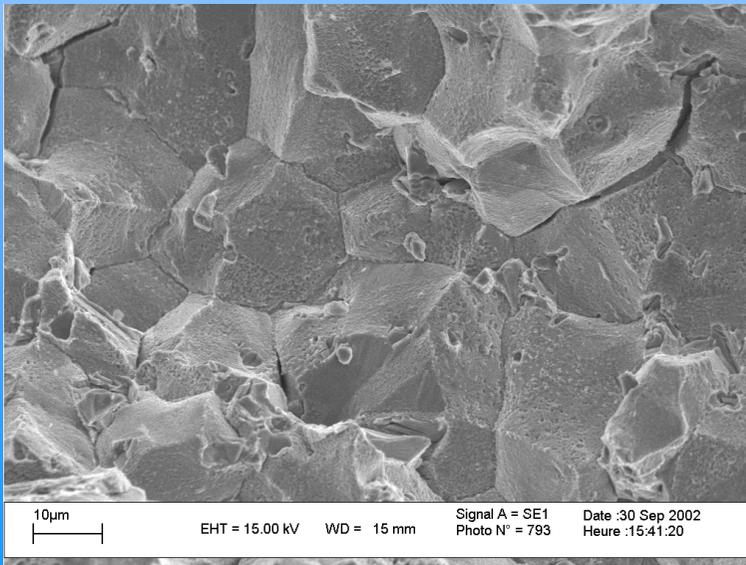
---

## 3 – Mode de propagation des fissures :

Selon le couple « alliage-milieu » les fissures:

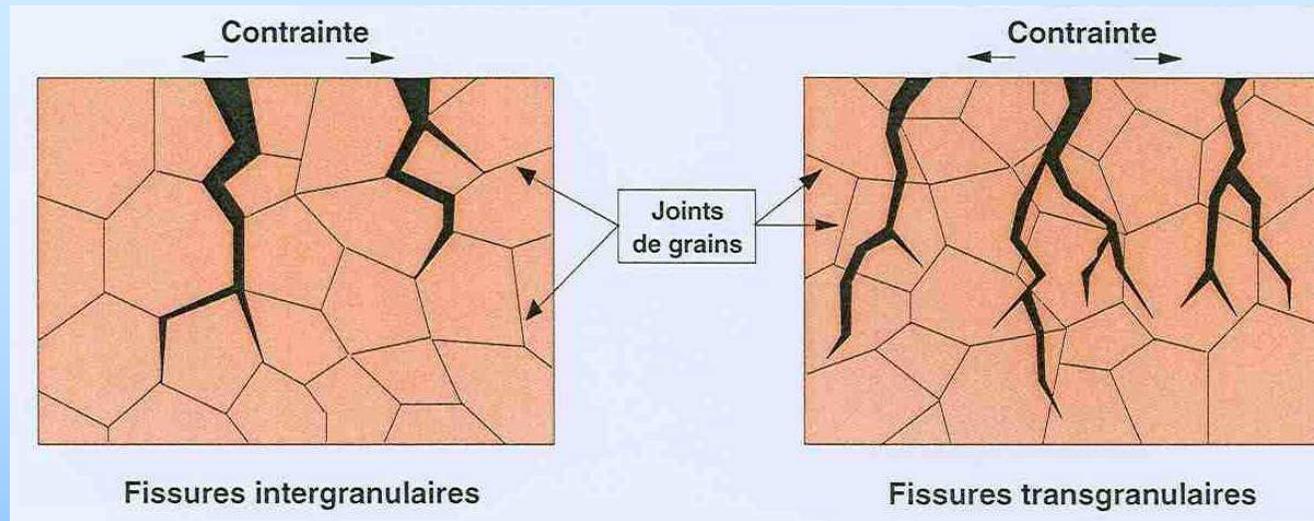
- ❑ progressent selon **des trajets intergranulaires** (le long des joints de grains), **transgranulaires** (à travers les grains) et plus rarement **mixtes**.
- ❑ et peuvent être simples ou branchées (ramifiées).

Les surfaces de rupture présentent **un aspect fragile**.

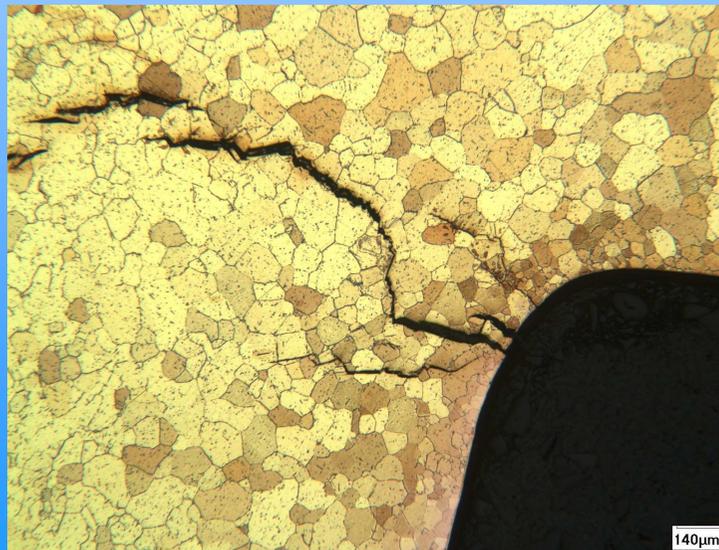


← *Rupture fragile du type intergranulaire*

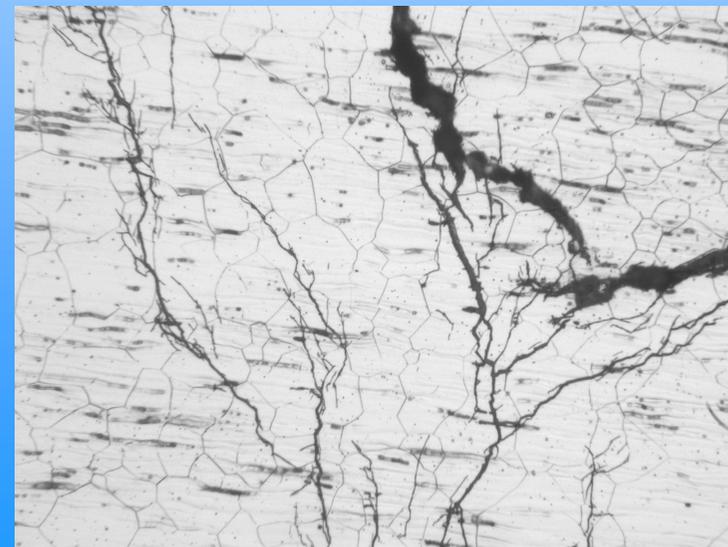
# COURS ENSITM



*Représentation schématique de fissures de CSC observées au microscope optique*



*Fissuration intergranulaire d'une connexion électrique en laiton étamé*



*Fissuration transgranulaire d'un acier inoxydable en 304L en présence de chlorure*

# COURS ENSITM

## 4 – Facteurs déterminants :

↳ **Couples matériau métallique-milieu** : les milieux susceptibles de provoquer la CSC sont très variables suivant les matériaux utilisés

Métaux et alliages	Milieu	Type de fissuration
Aciers au carbone	NaOH, KOH,..(solutions OH <sup>-</sup> ), nitrates , H <sub>2</sub> S (solution), mélanges acides H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> et HNO <sub>3</sub> ,...	I
Aciers inox	Solutions aqueuse halogénées (chlorurées), (eau de mer, MgCl <sub>2</sub> ) NaOH, KOH,...,H <sub>2</sub> O hte T° Acide polythioniques, Acide borique	T T I (et T) I
Cu et alliages Laitons α ou α-β Cu-Sn, Cu-Ni, Cu-Al	NH <sub>3</sub> (vapeurs et solutions), eau, vapeur d'eau, Amines	T (à bas pH) I (à pH neutre –Season Cracking)
Nickel et alliages	NaOH (solution ou soude fondue) H <sub>2</sub> O (liquide ou vapeur à hte T°)	I
Titane et alliages	Méthanol, HCl, eau de mer, acide nitrique fumant	I (et T)
Magnésium et alliages	Cl <sup>-</sup> + H <sub>2</sub> O (KHF <sub>2</sub> , NaCl+K <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub> ...)	T ou I
Al et alliages Al-Cu, Al-Mg, Al,Zn,..	NaCl+H <sub>2</sub> O (eau de mer, air humide, vapeur d'eau, Solution chlorurées oxydantes...)	I

## 5 – Autres facteurs déterminants :

### La nature du matériau:

La CSC est influencée par certains facteurs métallurgiques:

- la composition du métal,
- l'orientation des grains,
- la composition et répartition des précipités,
- dislocations, traitements thermiques,...

### Composition du milieu corrosif,

### L'état de surface du matériau,

### La température du milieu « corrosif »,

### Niveau (ou intensité) des contraintes appliquées.

# COURS ENSITM

---

## 6 – La prévention de la corrosion sous contrainte :

La CSC peut être limitée ou éliminée par une des méthodes suivantes:

- ❑ **En agissant sur le milieu :** *diminution de la teneur en Cl<sup>-</sup>, eau désoxygénée, utiliser des inhibiteurs de corrosion,...*
- ❑ **Utiliser des matériaux insensibles dans le milieu considéré :** *dans des milieux propices à la CSC, l'acier doux peut, par exemple, être mieux adapté que les inox,*
- ❑ **Diminuer le niveau de contraintes** *en surdimensionnant les pièces (ou structure),*
- ❑ **Éliminer les contraintes résiduelles** *par traitements thermiques de détente,*
- ❑ **Réaliser des traitements de surface** (grenailage, galetage,...) : *Ces traitements génèrent des contraintes superficielles de compression qui s'opposent à l'amorçage du processus de CSC.*

## LA CORROSION INTERGRANULAIRE :

### 1 - Définition:

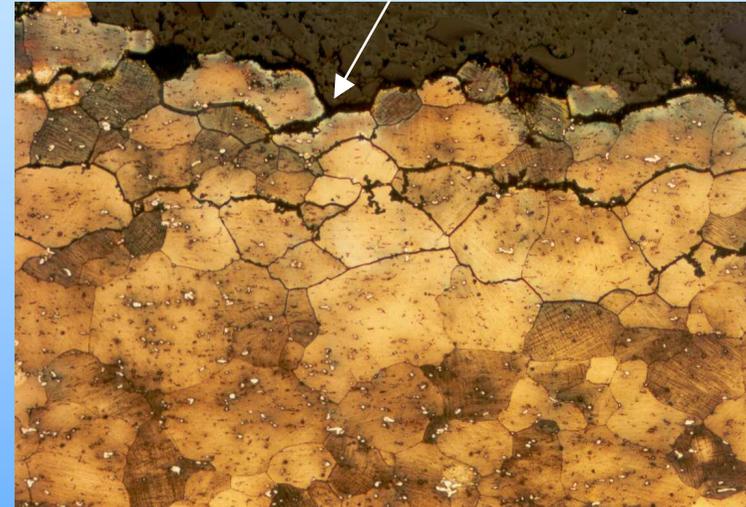
Dans **certains métaux ou alliages** il existe des régions qui se distinguent par leur composition chimique.

Par exemple les zones contiguës aux joints de grains peuvent s'enrichir ou s'appauvrir en éléments d'addition de l'alliage ou présenter naturellement un taux élevé en impuretés.

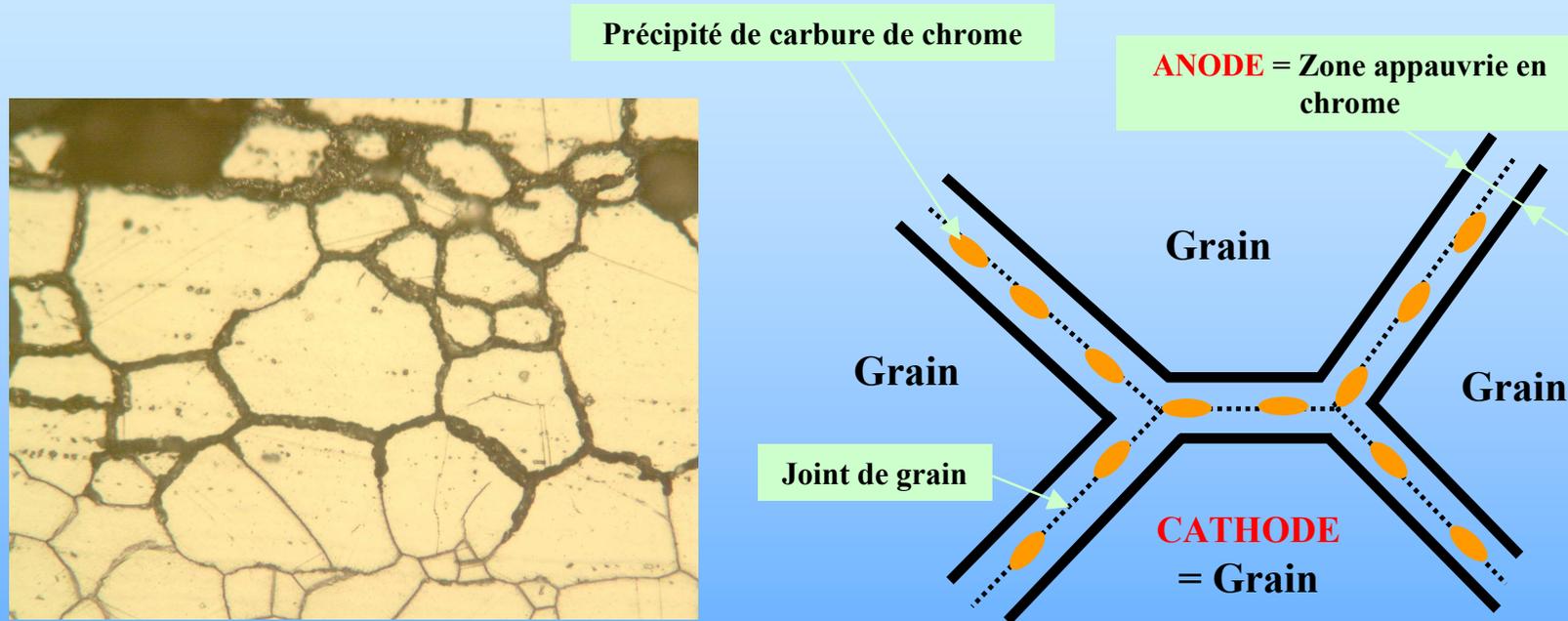
Ce qui provoque, en présence d'un milieu plus ou moins corrosif, des microcouplages galvaniques entre ces zones moins nobles et les grains de l'alliage plus noble. Les zones intercrystallines subissent dans ce cas une corrosion préférentielle pouvant conduire au « **déchaussement** » des grains et à la **désagrégation de la surface** métallique.

Certains aciers inoxydables et alliages d'aluminium à haute résistance mécanique sont particulièrement sensibles à cette forme de corrosion.

*« déchaussement » des grains et désagrégation de la surface d'un alliage d'aluminium*



## 2 – Corrosion intergranulaire des aciers inoxydables austénitiques :

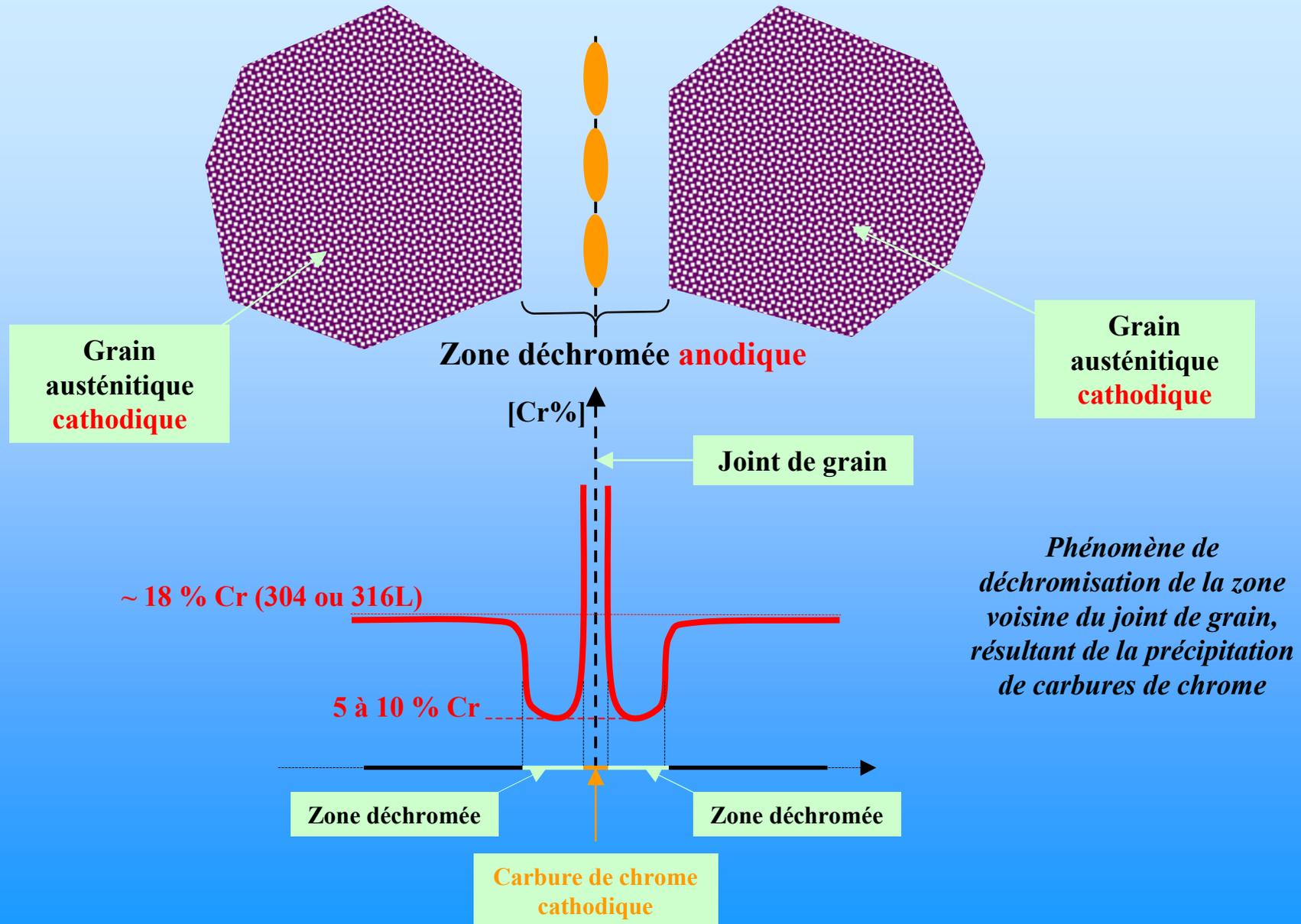


*Joint de grain d'un acier inoxydable sensibilisé*

Cette forme de corrosion affecte plus particulièrement les aciers inoxydables austénitiques. Elle est provoquée par une précipitation de carbures de chrome  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  aux joints de grains lors d'un maintien plus ou moins prolongé de la pièce dans une certaine plage de température (500 à 850°C). Les zones contiguës aux joints de grains se trouvent appauvries en chrome, et présentent une résistance à la corrosion semblable à celle d'un acier ordinaire.

Les aciers inoxydables présentant cette caractéristique sont dits **sensibilisés**.

# COURS ENSITM

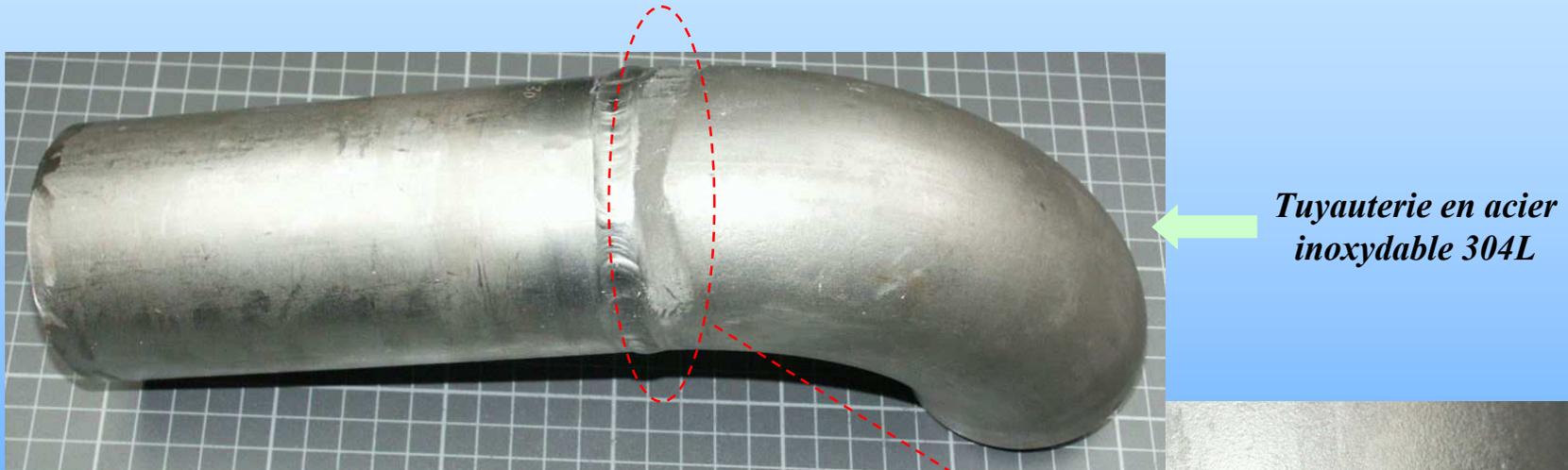


## COURS ENSITM

---

L'état sensibilisé d'un acier inoxydable austénitique peut être provoqué:

❑ Lors d'une opération de soudage:



*Attaque intergranulaire dans la zone affectée thermiquement de la soudure*  
*Les grains se déchaussent dans cette zone*



## COURS ENSITM

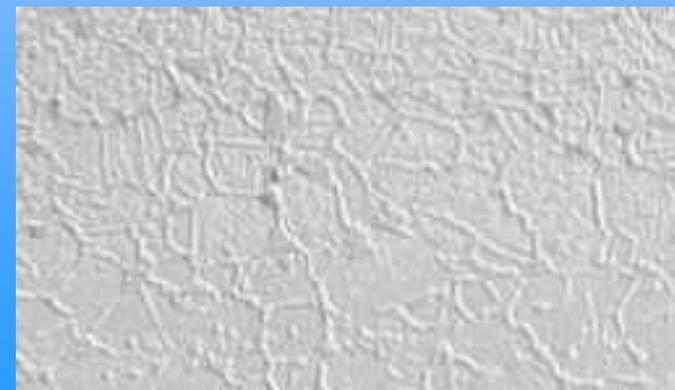
---

- ❑ **Par une vitesse de refroidissement trop lente** lors du traitement thermique,
- ❑ **Par une composition inadéquate de l'acier, en particulier en carbone**, élément qui contrôle en partie, la cinétique de précipitation des carbures,
- ❑ **Lors d'une température d'utilisation anormalement élevée de l'acier.**

*Acier inoxydable réfractaire 310S utilisé dans un incinérateur d'ordure ménagère*

*X8Cr25% Ni20% Si1.5%*

*Précipitation de carbure de chrome lors d'un maintien prolongé à haute température (~900°C)*



## COURS ENSITM

---

### 3 – Prévention de la corrosion intergranulaire des aciers inoxydables:

❑ Utiliser des nuances d'aciers inoxydables à très faible teneur en carbone (**moins de 0.03%**) : par exemple du type 304L ou 316L (L pour Low carbon),

❑ Utiliser des aciers inoxydables dits **stabilisés**, c'est-à-dire contenant un élément d'addition tel que le titane (Ti) ou le niobium (Nb), dont l'affinité pour le carbone est supérieure à celle du chrome, formant ainsi des TiC ou des NbC qui empêchent la formation des carbures de chrome responsables de la déchromisation,

❑ Réaliser un traitement thermique permettant de resolubiliser les carbures (*s'il y a eu sensibilisation préalable, lors d'une opération de soudage par exemple*).

Pour les aciers austénitiques, le traitement s'effectue aux environs de 1050°C suivi d'un refroidissement rapide (hypertrempe).

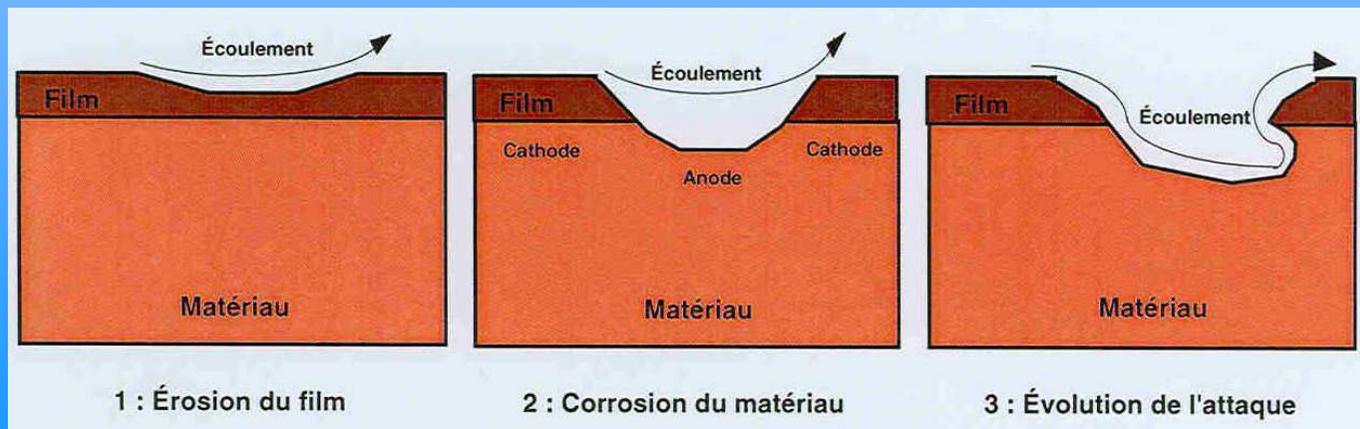
## LA CORROSION EROSION :

### 1 - Définition:

Cette forme de corrosion est produite par le mouvement (circulation) relatif d'un fluide plus ou moins corrosif et d'une surface métallique.

La corrosion érosion affecte l'ensemble des métaux et alliages et plus particulièrement les métaux passivables (acier inoxydable, aluminium,...) et les métaux de faible dureté (cuivre).

L'arrachement mécanique des oxydes, des produits de corrosion ou des dépôts protecteurs (couche de passivation, en l'occurrence) constituant un écran protecteur, provoque une activation de la surface métallique qui se dégrade plus rapidement.

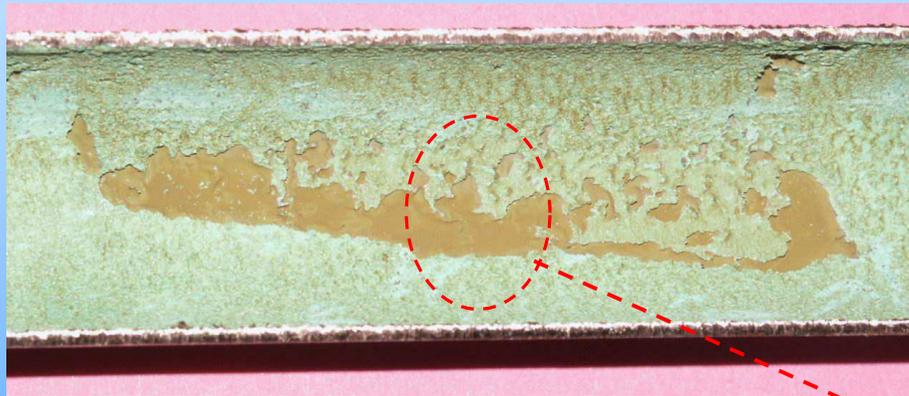


*Représentation schématique du phénomène de corrosion-érosion*

## COURS ENSITM

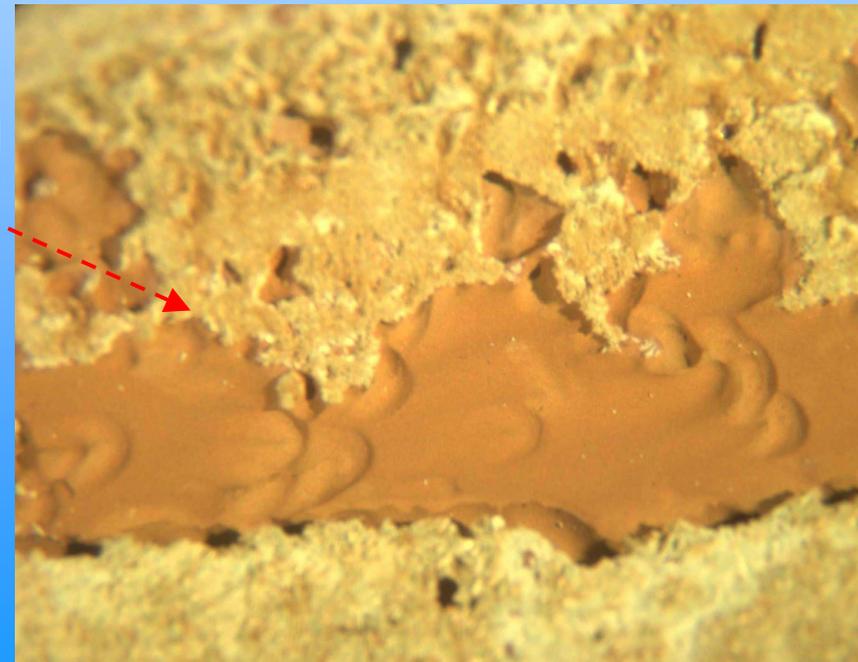
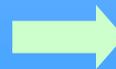
---

Les faciès obtenus en corrosion-érosion sont singuliers et se manifestent par l'apparition de sillons, vallées, surfaces ondulées, trous, ...ayant un aspect directionnel caractérisé (queue de comète, fer à cheval,....).



*Corrosion-érosion d'un réseau d'eau chaude sanitaire en cuivre provoquée par une vitesse de l'eau excessive*

*Faciès caractéristique en fer à cheval*



## COURS ENSITM

---



*Corrosion-érosion, après trois semaines d'utilisation, d'une roue turbine en acier inoxydable 316L en milieu acide sulfurique (+particules en suspension)*

*Faciès caractéristique en queue de comète*

## 2 – Facteur déterminant :

- ❑ **La vitesse de circulation** du fluide corrosif, l'attaque peut être pratiquement nulle au-dessous d'une certaine vitesse et augmenter rapidement pour des vitesses supérieures,
- ❑ Les projections de **particules en suspension** dans le fluide,
- ❑ **La conception** du réseau véhiculant le fluide.

# COURS ENSITM

## 2 – Prévention de la corrosion - érosion :

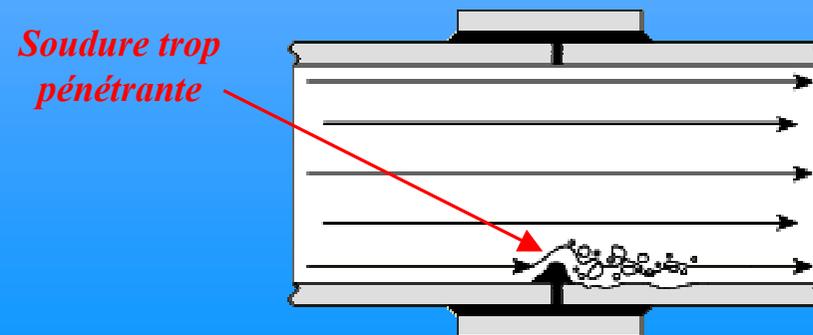
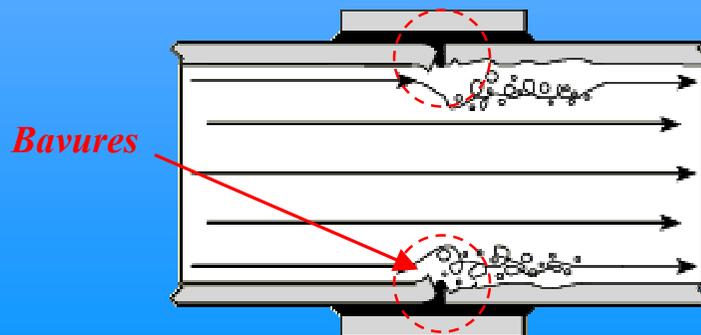
- ❑ Éviter les vitesses d'écoulement trop importante :

*Vitesse recommandée pour la tuyauterie cuivre  
« centre d'information du cuivre »*



	Circuit d'eau chaude en boucle et chauffage traditionnel				Planchers chauffants
Dimension en mm	14 x 1	18 x 1	25 x 1	35 x 1	14 x 0,8
Vitesse m/s	0,50	0,60	0,80	0,90	0,80

- ❑ Éviter tout ce qui est propice à l'établissement de régimes turbulents :  
Attention aux **soudures trop pénétrantes, raccords, bavures,**...

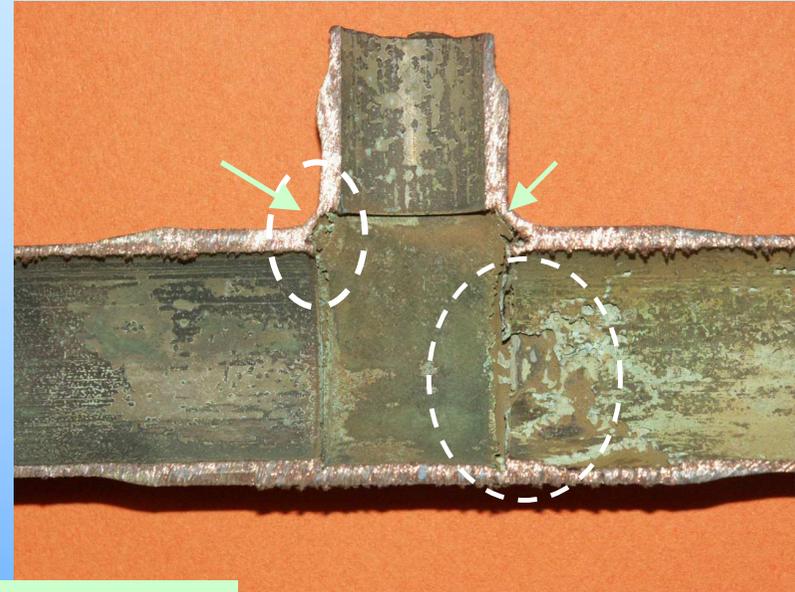
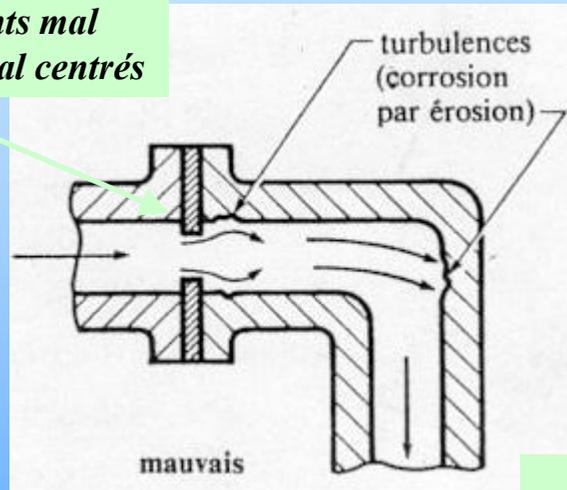


# COURS ENSITM

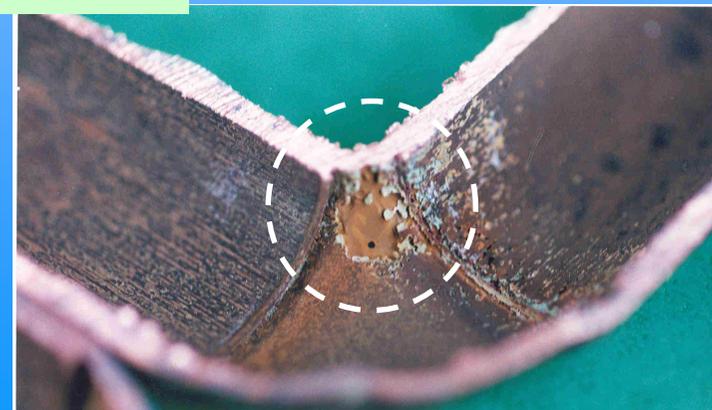
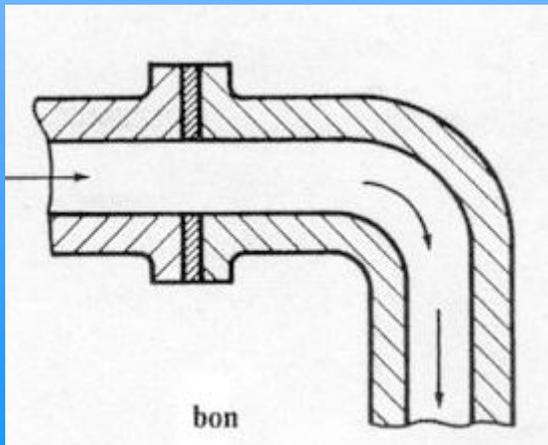
## 2 – Prévention de la corrosion - érosion : (suite)

❑ Éviter les variations brutales de direction :

*Attention au joints mal dimensionnés ou mal centrés*



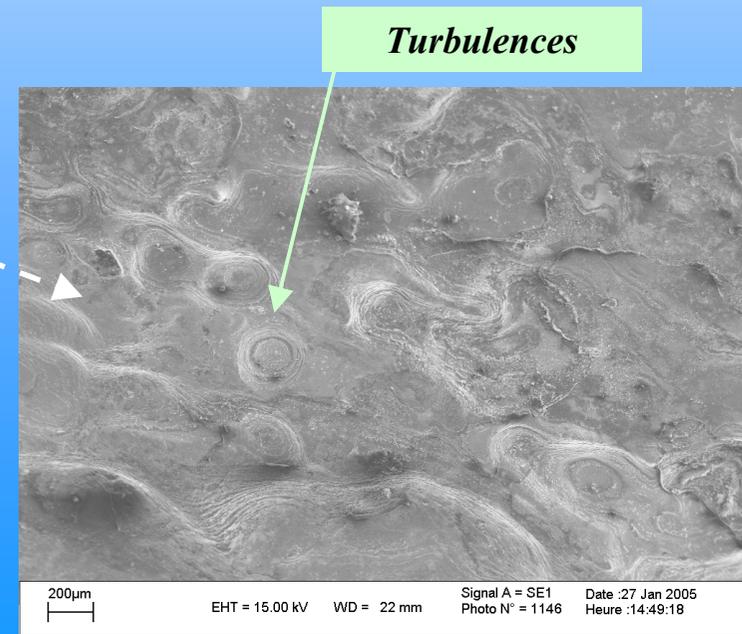
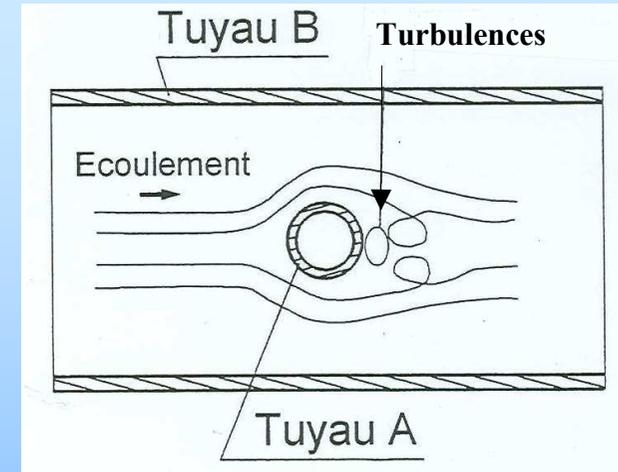
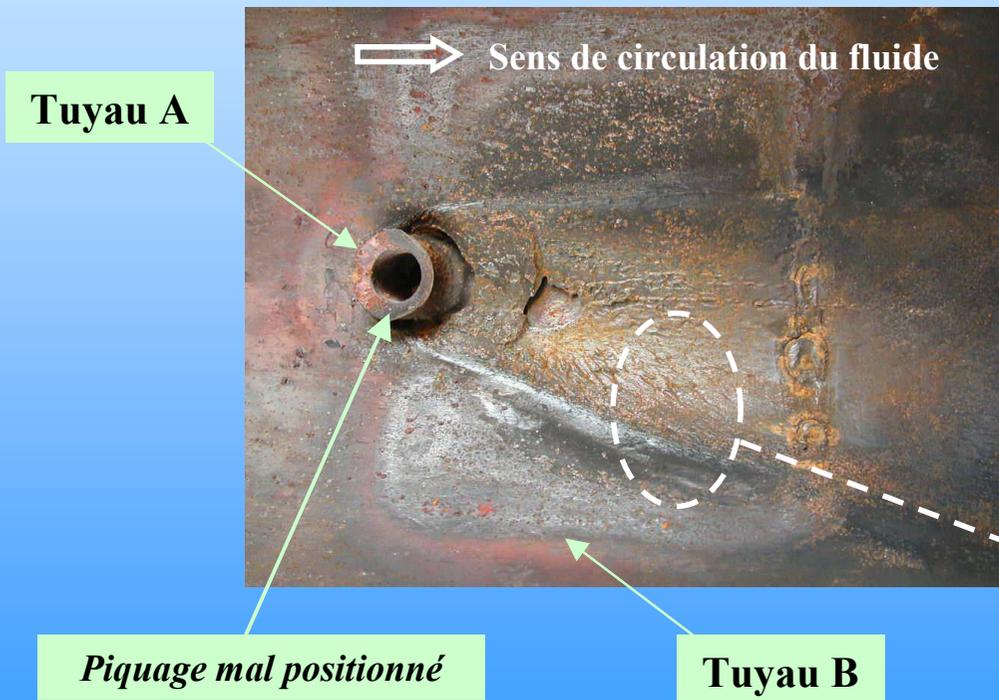
*Éviter les coudes à 90° avec de faible rayon de courbure*



# COURS ENSITM

## 2 – Prévention de la corrosion - érosion : (suite)

- ❑ Éviter, les obstacles:



## 2 – Prévention de la corrosion - érosion : (suite)

❑ On peut également :

- **Choisir un matériau plus résistant,**

- Agir sur le milieu corrosif (*en diminuant la vitesse, en supprimant les particules en suspension par filtrage, contrôler la teneur en oxygène, abaisser la température, ou en introduisant des inhibiteurs de corrosion*),

- **ou utiliser un revêtement protecteur,..**

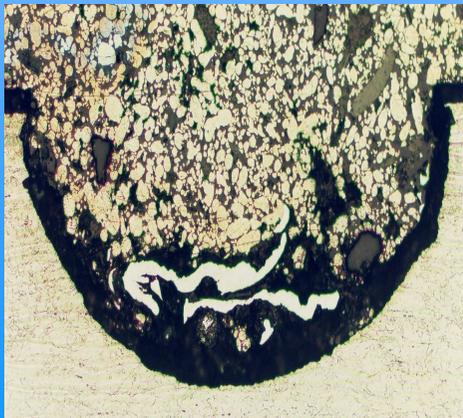
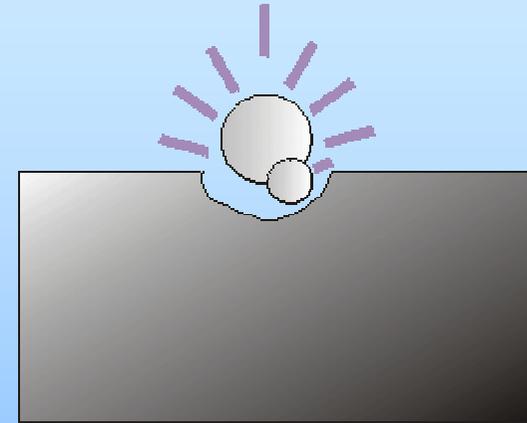
## LA CORROSION CAVITATION :

### 1 - Définition:

Cette forme de dégradation est directement liée à des régimes turbulents.

Elle est due à l'implosion brutale de bulles gazeuses naissant au sein du liquide pendant des phases de dépression.

La cavitation est souvent associée à des variations brutales de pression liées aux paramètres hydrodynamiques du fluide: lorsqu'un fluide liquide circulant à grande vitesse est soumis à des variations de pression, il se crée des bulles sur la surface métallique, par vaporisation du fluide dans les zones de dépression.

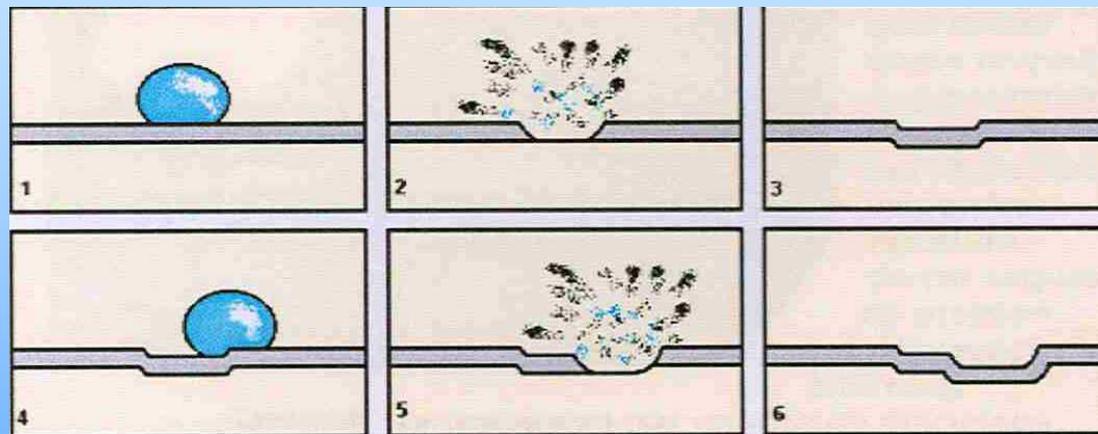


Les implosions successives résultant de ces vagues de pression et dépression alternées se traduisent par un intense martelage de la surface pouvant conduire à des déformations plastiques locales importantes générant de petites cavités superficielles.

## COURS ENSITM

---

Les alliages passivables tels que les aciers inoxydables sont très sensibles dans la mesure où les implosions successives détruisent le film protecteur superficiel (c'est-à-dire la couche de passivation) provoquant ainsi une corrosion localisée.



*Représentation schématique des diverses étapes lors de la cavitation*

*Cavitation dans une chambre de moteur diesel*

