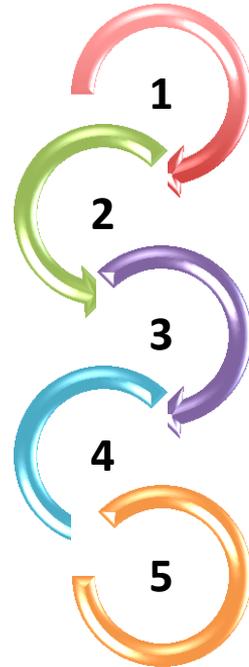


# Les risques de corrosion des aciers en milieu marin

Nadège DUCOMMUN



# SOMMAIRE



Définitions

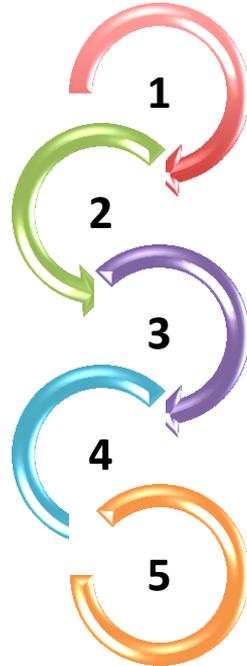
Aciers non alliés

Aciers inoxydables

Moyens de protection

Cas concret

# SOMMAIRE



Définitions

Aciers non alliés

Aciers inoxydables

Moyens de protection

Cas concret

# DEFINITIONS

## A l'état naturel deux formes distinctes

- ▶ Forme principale: état oxydé dans les minerais ( bauxite pour l'aluminium, hématite pour le fer)
- ▶ Rares exceptions: état natif ( platine, or, palladium, argent...)



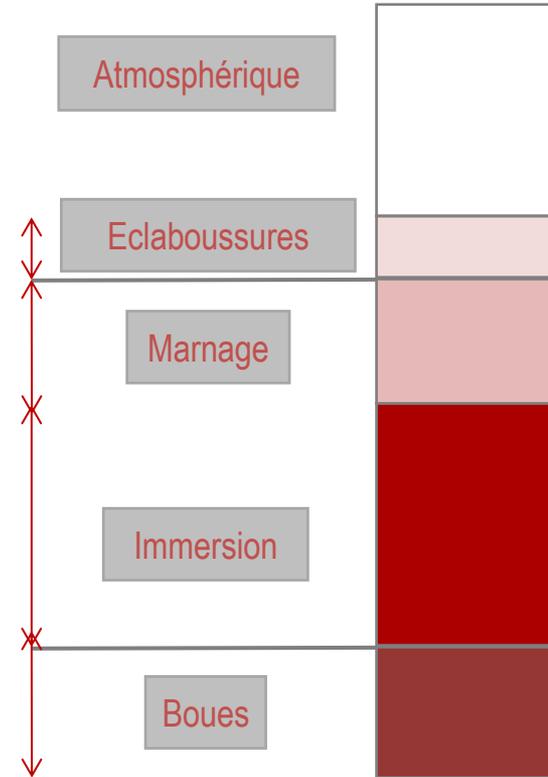
***Corrosion = retour à l'état d'oxyde naturel***

***Corrosion = oxydo-réduction***

# DEFINITIONS

## CORROSION ATMOSPHERIQUE

- ▶ Classification de la corrosivité
- ▶ NF EN ISO 9223: C3, C4, C5 ; CX

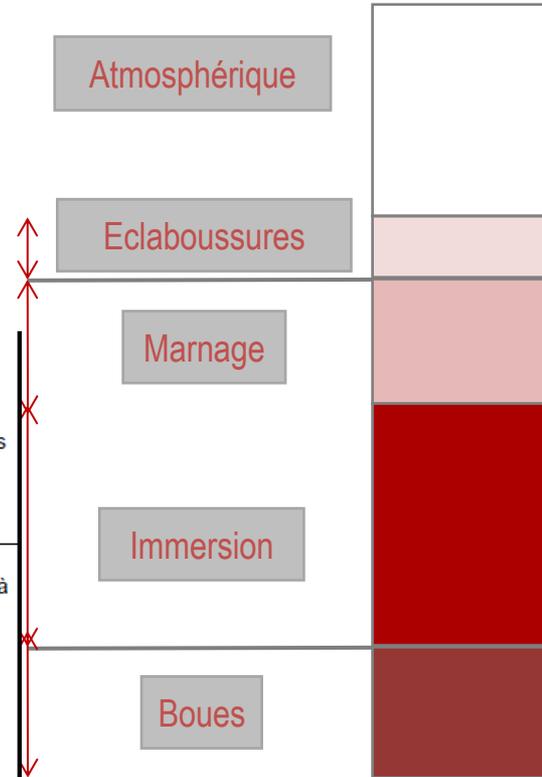


# DEFINITIONS

## CORROSION ATMOSPHERIQUE

- ▶ Classification de la corrosivité
- ▶ NF EN ISO 9223: C3, C4, C5 ; CX

C3	Moyenne	Espaces avec fréquence modérée de condensation et pollution modérée provenant des processus de production, par exemple usines agro-alimentaires, blanchisseries, brasseries, laiteries	Zone tempérée, environnement atmosphérique moyennement pollué (SO <sub>2</sub> : 5 µg/m <sup>3</sup> à 30 µg/m <sup>3</sup> ) ou avec un certain effet des chlorures, par exemple zones urbaines, zones côtières avec faibles dépôts de chlorures  Zones subtropicales et tropicales, atmosphère faiblement polluée
C4	Élevée	Espaces avec fréquence élevée de condensation et pollution sévère provenant des processus de production, par exemple usines de traitements industriels, piscines	Zone tempérée, environnement atmosphérique très pollué (SO <sub>2</sub> : 30 µg/m <sup>3</sup> à 90 µg/m <sup>3</sup> ) ou effet important des chlorures, par exemple zones urbaines polluées, zones industrielles, zones côtières sans projections d'eau de mer ni exposition au puissant effet des sels de dégivrage  Zones subtropicales et tropicales, atmosphère moyennement polluée
C5	Très élevée	Espaces avec fréquence très élevée de condensation et/ou à très forte pollution provenant des processus de production, par exemple mines, gisements pour exploitation industrielle, hangars non ventilés dans des zones subtropicales et tropicales	Zone tempérée et subtropicale, environnement atmosphérique très pollué (SO <sub>2</sub> : 90 µg/m <sup>3</sup> à 250 µg/m <sup>3</sup> ) et/ou effet important des chlorures, par exemple zones industrielles, zones côtières, emplacements protégés au niveau du littoral



# DEFINITIONS

## CORROSION ATMOSPHERIQUE

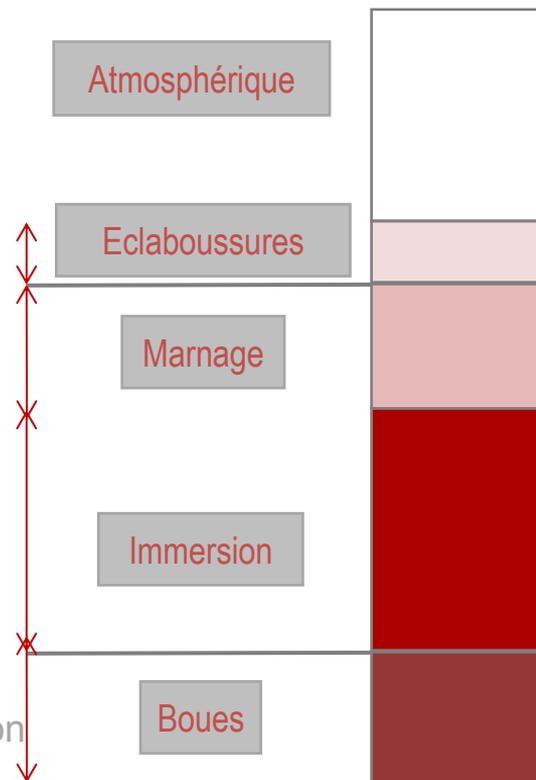
- ▶ Classification de la corrosivité
- ▶ NF EN ISO 9223: C3, C4, C5 ; CX

## CORROSION PAR IMMERSION

- ▶ NF EN ISO 12944-2: Im2

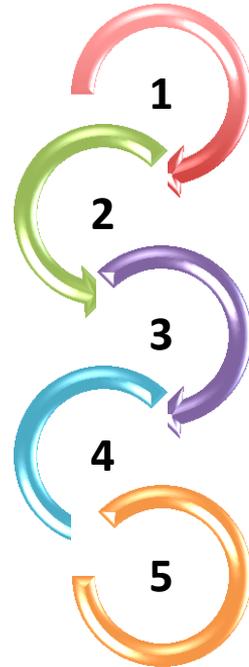
Composition complexe:

- ▶ Sels minéraux dissous
- ▶ Matière organique, vivante ou en décomposition
- ▶ Gaz dissous, parmi lesquels 5 à 6 ppm d 'oxygène



**Forte corrosivité**

# SOMMAIRE



Définitions

Aciers non alliés

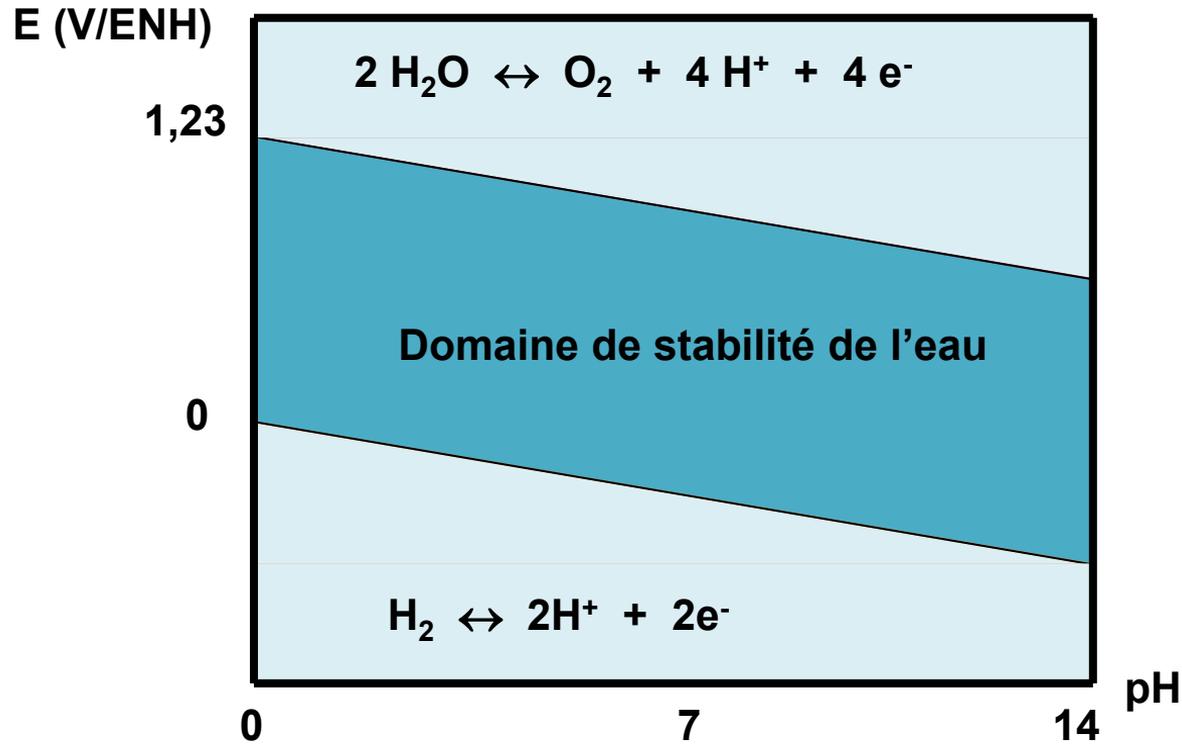
Aciers inoxydables

Moyens de protection

Cas concret

# CAS DES ACIERS NON ALLIÉS

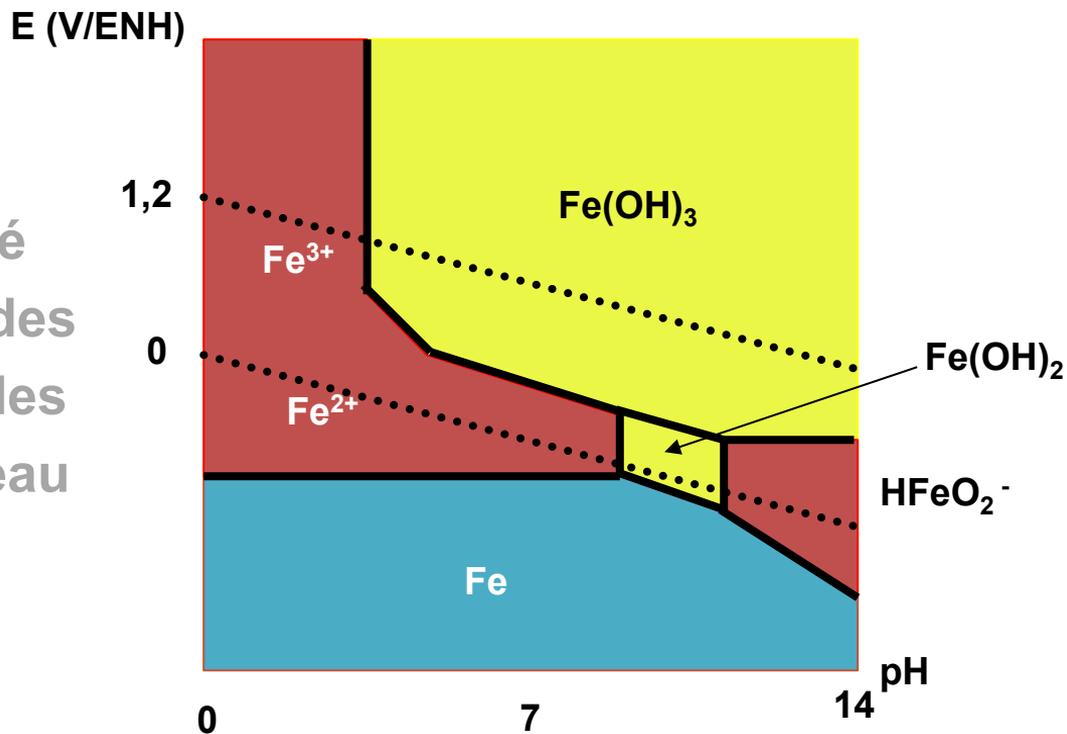
## Diagramme de Pourbaix



# CAS DES ACIERS NON ALLIÉS

## Diagramme de Pourbaix

Domaine de stabilité  
thermodynamique des  
produits résultant des  
interactions métal eau



# CAS DES ACIERS NON ALLIÉS

## Diagramme de Pourbaix

### IMMUNITÉ

Le métal et le milieu sont dans un état de stabilité thermodynamique: Pas de réactivité

### PASSIVITÉ

Aucun état de stabilité: Métal recouvert d'un film protecteur

La passivité peut dégénérer en corrosion localisée

### ACTIVITÉ

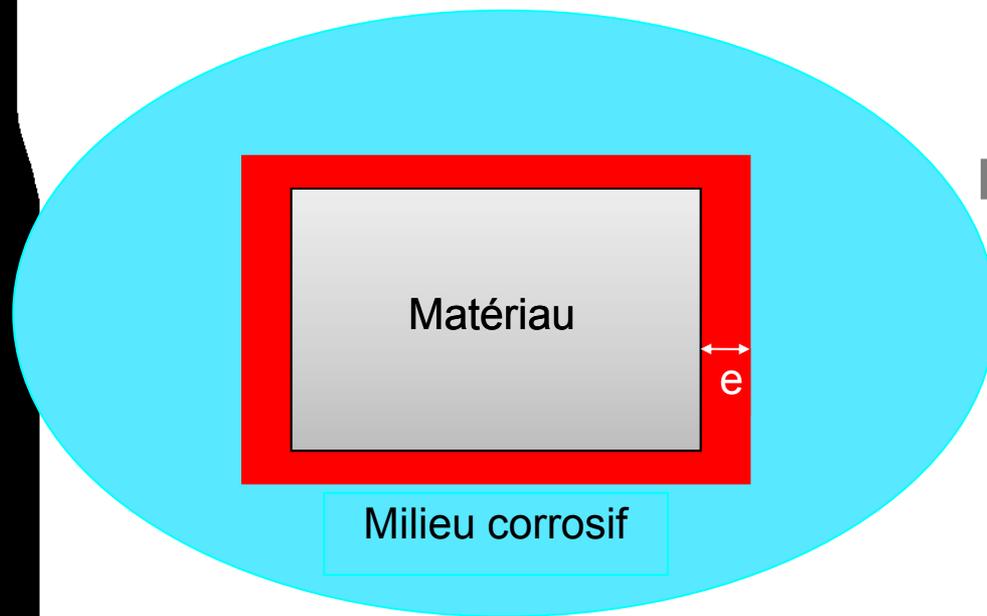
Métal pas stable, pas recouvert par un film protecteur

Il réagit avec le milieu : il se corrode

La corrosion est souvent généralisée.

**Indication sur la possibilité ou non de corrosion mais pas d'informations sur la vitesse de corrosion.**

# CAS DES ACIERS NON ALLIÉS: CORROSION UNIFORME



## Perte uniforme d'épaisseur

- ▶ Facilement contrôlable
- ▶ Durée de vie accessible

# CAS DES ACIERS

## Quelques chiffres

- ▶ Vitesse de corrosion en immersion
  - ▶ 100 à 500  $\mu\text{m}/\text{an}$
  
- ▶ Vitesse de corrosion atmosphérique
  - ▶ C3 25 à 50  $\mu\text{m}/\text{an}$
  - ▶ C4 50 à 80  $\mu\text{m}/\text{an}$
  - ▶ C5 80 à 200  $\mu\text{m}/\text{an}$



# CAS DES ACIERS NON ALLIÉS

14

## Facteurs d'influences

- ▶ Composition
- ▶ Etats de surfaces
- ▶ Caractéristiques du milieu
  - ▶ Teneur en O<sub>2</sub>
  - ▶ pH
  - ▶ Vitesse de circulation

Faible influence



Forte influence

# CAS DES ACIERS NON ALLIE

## EXEMPLE

Corrosion atmosphérique

Fer pur ARMCO ( $> 99\%$  Fe et très bas carbone  $< 0,005$ )

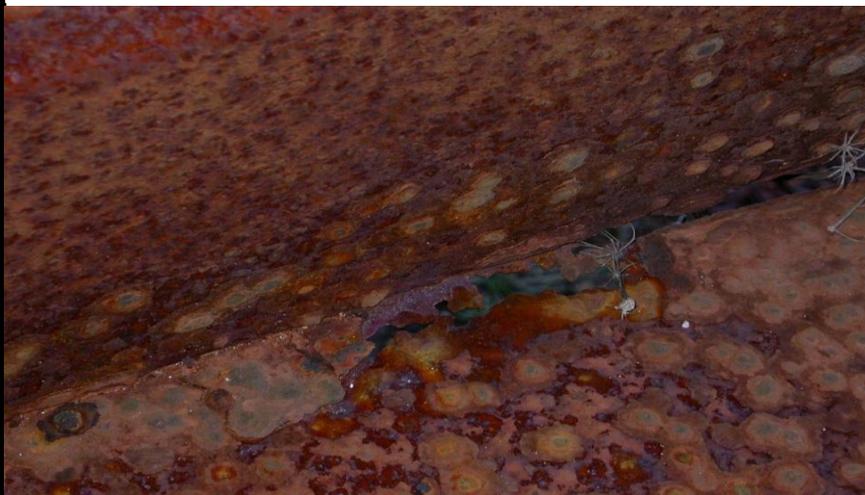


# CAS DES ACIERS NON ALLIE

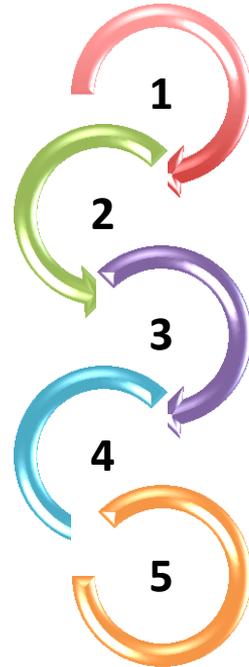
## EXEMPLE

Corrosion atmosphérique

Fer pur ARMCO (> 99 % Fe et très bas carbone < 0,005)



# SOMMAIRE



Définitions

Aciers non alliés

Aciers inoxydables

Moyens de protection

Cas concret

# CAS DES ACIERS INOXYDABLES

## Passivation

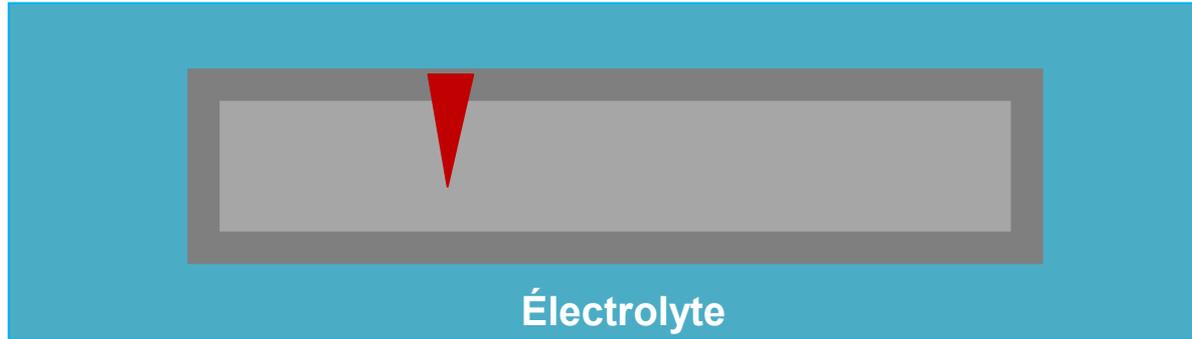


- ▶ Couche d'oxyde très mince (1/1000 micron)
- ▶ Protection anticorrosion du matériau

Défauts dans la couche → **Corrosion**

# CAS DES ACIERS INOXYDABLES

## CORROSION PAR PIQÛRES



Rupture locale de passivation



Variation du potentiel de surface



Potentiel de piquête

**ROLE DES ELEMENTS D'ALLIAGE**

# CAS DES ACIERS INOXYDABLES

## CORROSION PAR PIQÛRES

**ACIERS INOXYDABLES  $\Rightarrow$  BASES NICKEL**

Martensitiques; Ferritiques; Austénitiques; Austéno-ferritiques

- ▶ Potentiels de piqûres.
- ▶ Températures critique de piqûres.
- ▶ PREN (Index de tenue à la corrosion par piqûres).

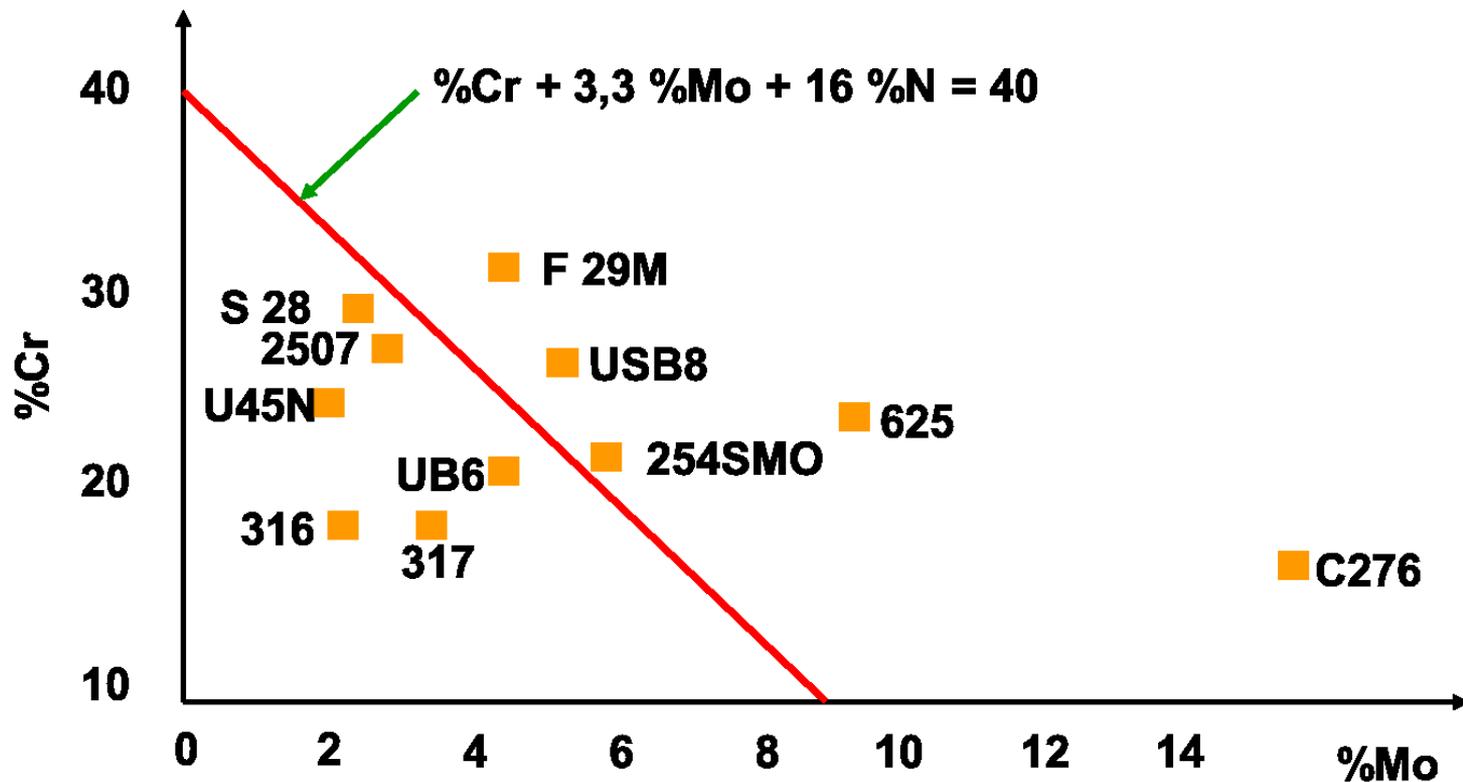
$$\text{PREN} = \text{Cr \%} + 3,3 \text{ Mo \%} + 16 \text{ N \%}$$

PREN > 40 en eau de mer

- ▶ Teneurs limites en polluants.

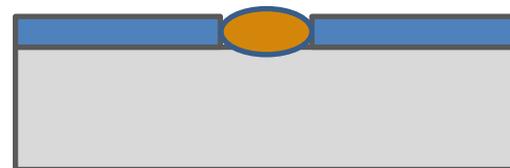
# CAS DES ACIERS INOXYDABLES

## CORROSION PAR PIQÛRES



# CAS DES ACIERS INOXYDABLES

## CORROSION PAR PIQÛRES



### Incrustation de particules de fer:

Destruction locale de la couche passive = Corrosion par piqûres

### Facteurs d'influence:



- ▶ Pollution lubrifiant
- ▶ Utilisation d'outils non dédiés aux aciers inoxydables
- ▶ Utilisation d'outils en acier non alliés
- ▶ Projection de particules lors de meulage
- ▶ ...

### Prévention



- ▶ Réalisation d'une décontamination ou passivation (ASTM A 380)

# CAS DES ACIERS INOXYDABLES

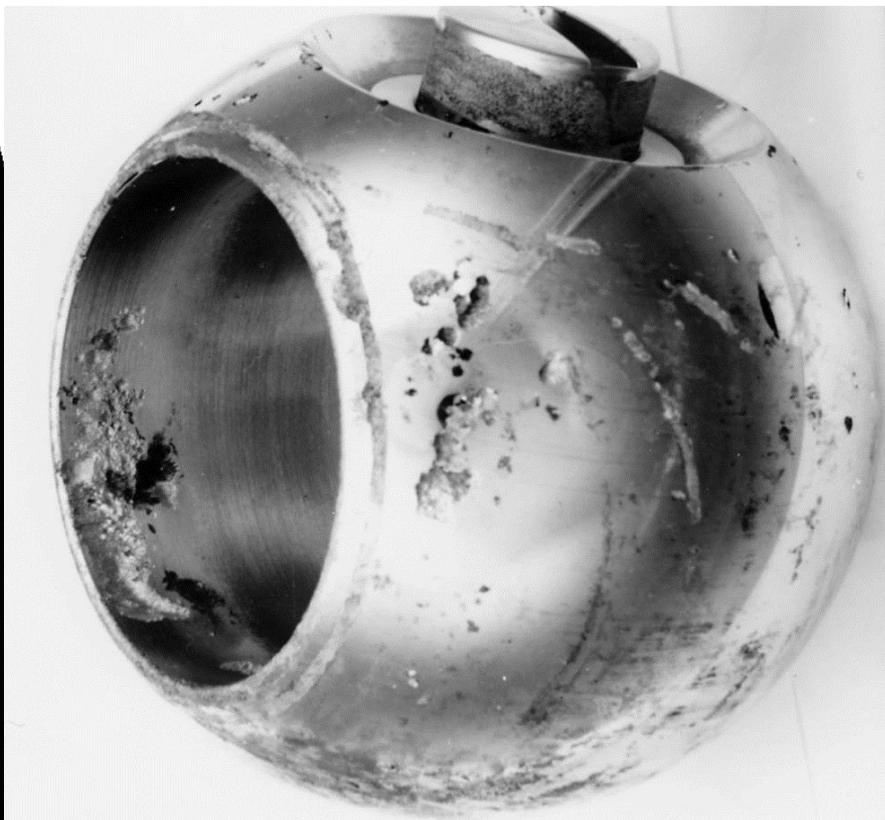
## CORROSION PAR PIQÛRES- EXEMPLE



- ▶ 17 4 PH
- ▶ Atmosphère marine

# CAS DES ACIERS INOXYDABLES

## CORROSION PAR PIQÛRES - EXEMPLE



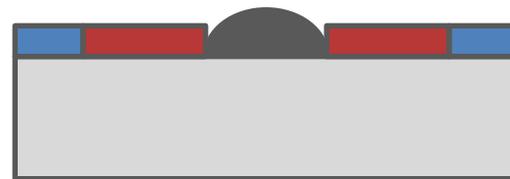
- ▶ Boisseau en 316L
- ▶ Circuit eau de mer
- ▶ Corrosion par piqûres  
Corrosion caverneuse

# CAS DES ACIERS INOXYDABLES

## CORROSION PAR PIQÛRES

### Coloration de la Zone Affectée Thermiquement:

Présence d'oxydes non/peu protecteur = Corrosion par piqûres

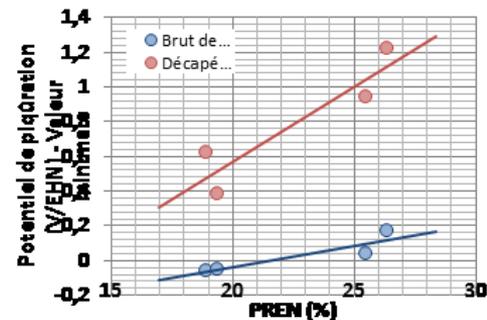


### Facteurs d'influence:

- ▶ Soudure en présence d'O<sub>2</sub>
- ▶ Traitement Thermique en présence d'O<sub>2</sub>

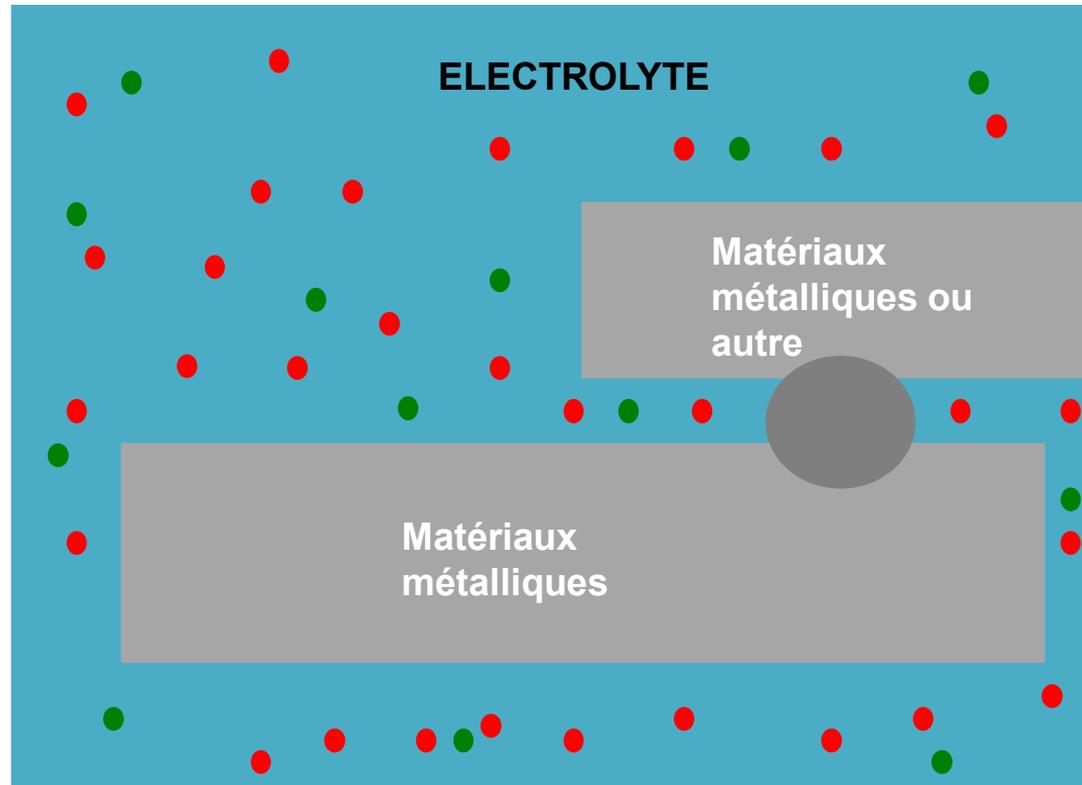
### Prévention

- ▶ Réalisation d'un décapage (ASTM A 380)



# CAS DES ACIERS INOXYDABLES

## CORROSION CAVERNEUSE



# CAS DES ACIERS INOXYDABLES

## CORROSION CAVERNEUSE

**ACIERS INOXYDABLES ⇒ BASES NICKEL**

Martensitiques; Ferritiques; Austénitiques; Austéno-ferritiques

- ▶ PREN (Index de tenue à la corrosion par piqûres).

$$\text{PREN} = \text{Cr \%} + 3,3 \text{ Mo \%} + 16 \text{ N \%}$$

PREN > 45 en eau de mer

- ▶ pH de dépassivation
- ▶ Température critique de corrosion caverneuse
- ▶ Teneurs limites en polluants.

# CAS DES ACIERS INOXYDABLES

## CORROSION CAVERNEUSE

<b>Nuance d'acier inoxydable</b>	<b>exposition en eau de mer stagnante (T°&lt;60°C)</b>
<b>304L</b>	<b>piqûres et cavernes après quelques semaines</b>
<b>316L, 317,321</b>	<b>résistent 1 ou 2 mois de plus que 304L</b>
<b>URANUS 52 N</b>	<b>excellent comportement mais corrosion caverneuse possible</b>

# CAS DES ACIERS INOXYDABLES

## CORROSION CAVERNEUSE



### Importance de la qualité de réalisation des soudures

- ▶ Utilisation d'un gaz inerte face envers (N<sub>2</sub>, Ar)
  - ▶ Absence de rochage responsable de corrosion caverneuse
- ▶ Maitrise des règles de l'art
  - ▶ Absence de manque de pénétration responsable de corrosion caverneuse

# CAS DES ACIERS INOXYDABLES

## CORROSION CAVERNEUSE - EXEMPLE



- ▶ Tuyauterie en 316L
- ▶ Eau d'infiltration
- ▶ Corrosion caverneuse sous dépôts

# CAS DES ACIERS INOXYDABLES

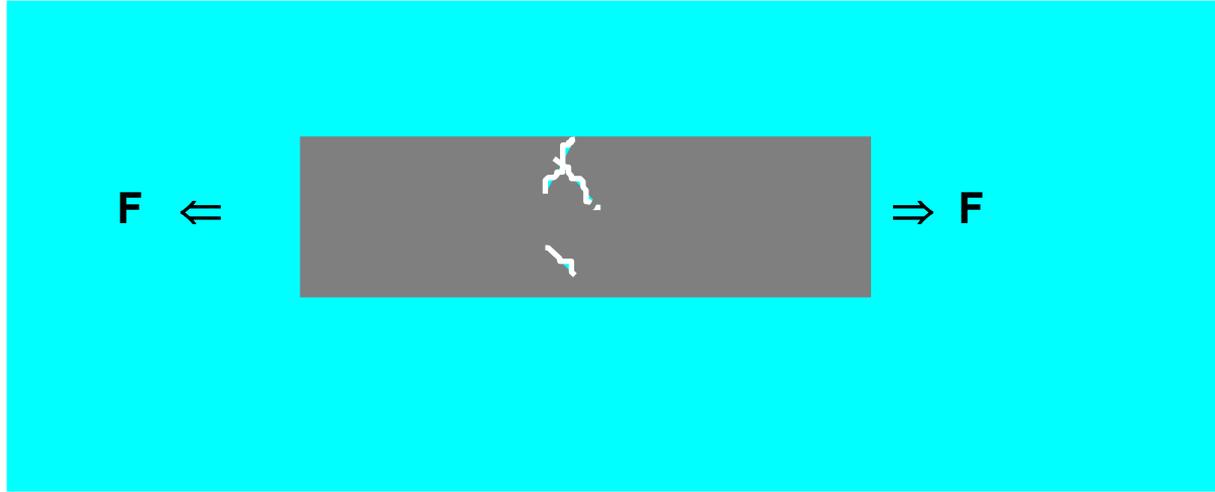
## CORROSION CAVERNEUSE - EXEMPLE



- ▶ Pompe eau de mer
- ▶ 14-4 PH et 316L
- ▶ Corrosion caverneuse
- ▶ **CONCEPTION**

# CAS DES ACIERS INOXYDABLES

## CORROSION SOUS CONTRAINTES



MILIEU CORROSIF

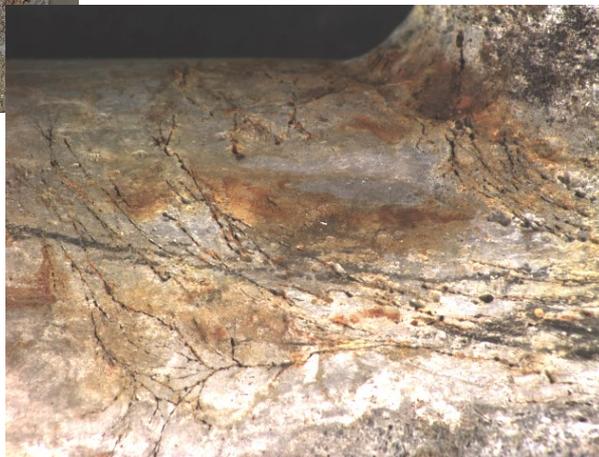
+

CONTRAINTES DE TRACTION

Aciers inoxydables austénitiques très sensibles si  $T > 60^{\circ}\text{C}$  et présence de  $\text{Cl}^-$

# CAS DES ACIERS INOXYDABLES

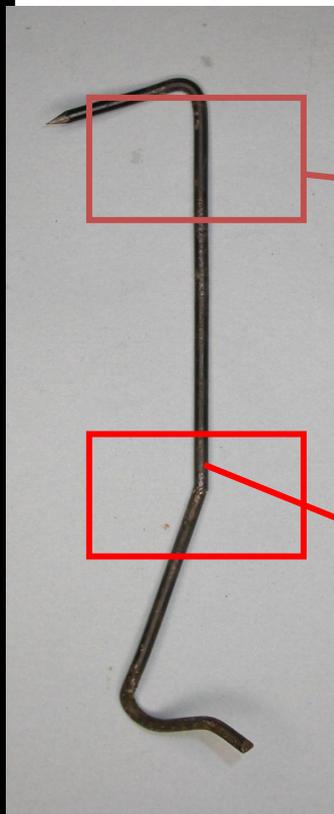
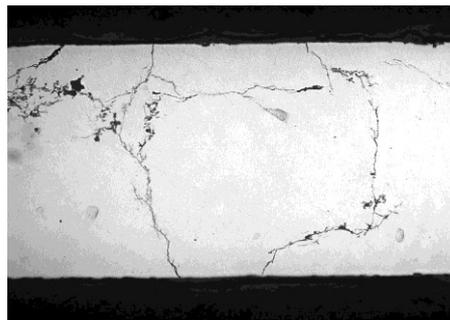
## CORROSION SOUS CONTRAINTES



- ▶ Cuve de stockage
- ▶ Soudure
- ▶ Température  $>60^{\circ}\text{C}$

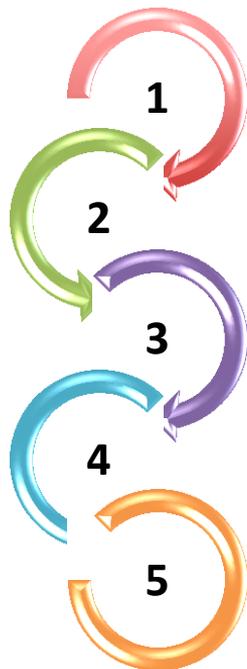
# CAS DES ACIERS INOXYDABLES

## CORROSION SOUS CONTRAINTES



- ▶ Crochets d'ardoise en bord de mer
- ▶ Corrosion sous contraintes
- ▶ 204Cu

# SOMMAIRE



Définitions

Aciers non alliés

Aciers inoxydables

Moyens de protection

Cas concret

# MOYENS DE PROTECTION

## ACIERS NON ALLIÉS: SUREPAISSEURS

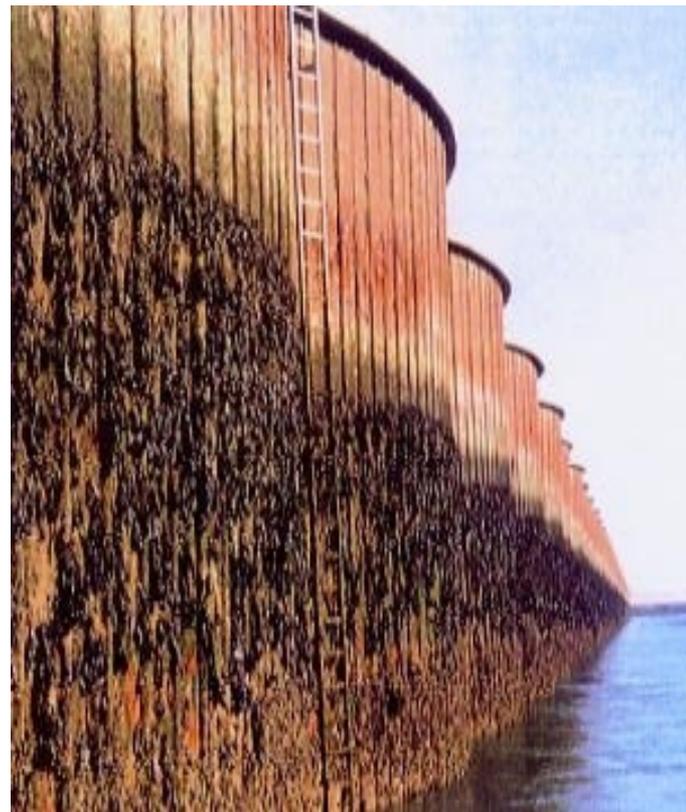
$$E_u = E_f + E_c$$

$$E_c = V_c \times D \times 1,5$$

D = durée de vie

V<sub>c</sub> = vitesse de corrosion

- ▶ Essais en laboratoire
- ▶ Essais sur site
- ▶ Tables de corrosion
- ▶ Spécification / normes



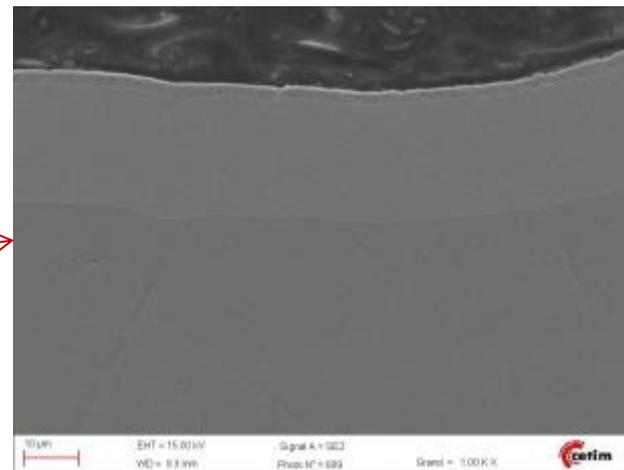
# MOYENS DE PROTECTION

## ACIERS NON ALLIÉS: TRAITEMENTS DE SURFACE

### Revêtements métalliques

▶ Nobles

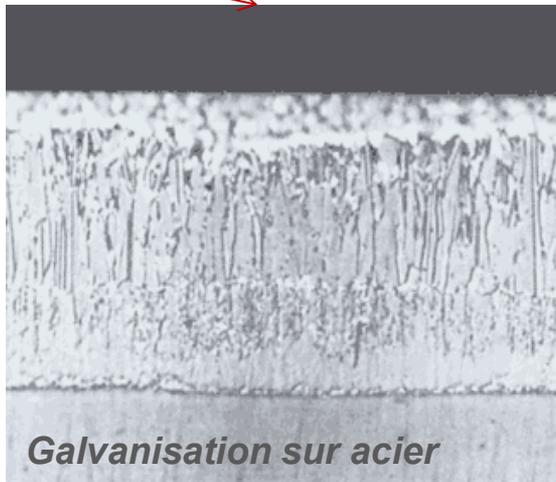
▶ Sacrificiels



*Ni chimique sur acier*

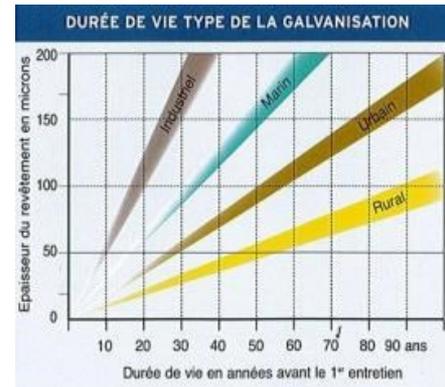
### Céramiques

### Peinture



*Galvanisation sur acier*

Durée de vie : fonction de l'épaisseur



# MOYENS DE PROTECTION

## ACIERS NON ALLIES ET INOX: PROTECTION CATHODIQUE



**En immersion (eau de mer, eau, béton, sol, solutions chimiques)**

▶ Par anodes galvaniques

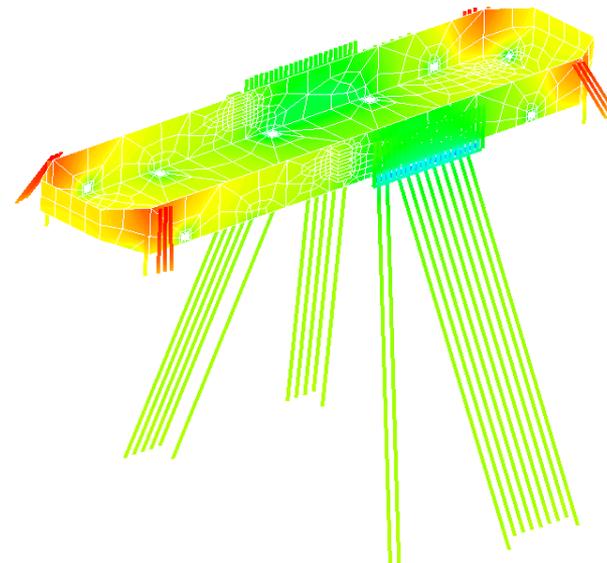
▶ Par courant imposé

**Importance du dimensionnement**

▶ Simulation numérique (PROCOR)

Potentiels

mV



# MOYENS DE PROTECTION

## ACIERS INOXYDABLES

▶ **Choix des matériaux**



$$\text{PREN} = \text{Cr \%} + 3,3 \text{ Mo \%} + 16 \text{ N \%}$$

▶ Qualité de la couche passive

▶ Etat de surface

▶ Entretien

# MOYENS DE PROTECTION

## ACIERS INOXYDABLES

▶ Choix des matériaux

▶ **Qualité de la couche passive**



Cas des soudures

▶ Etat de surface

▶ Entretien

# MOYENS DE PROTECTION

## ACIERS INOXYDABLES

▶ Choix des matériaux

▶ Qualité de la couche passive

▶ **Etat de surface**



Soigner: la rugosité

Eviter la pollution

▶ Entretien

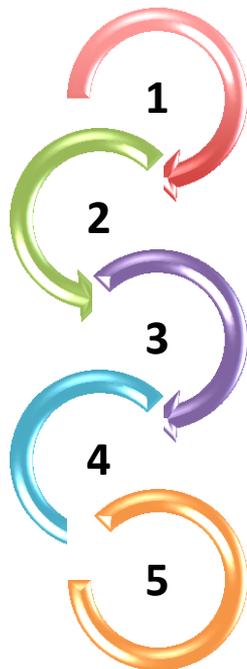
# MOYENS DE PROTECTION ACIERS INOXYDABLES

- ▶ Choix des matériaux
- ▶ Qualité de la couche passive
- ▶ Etat de surface
- ▶ **Entretien**



Lavage régulier des surfaces

# SOMMAIRE



Définitions

Aciers non alliés

Aciers inoxydables

Moyens de protection

Cas concret

# CAS CONCRET

## CONTEXTE

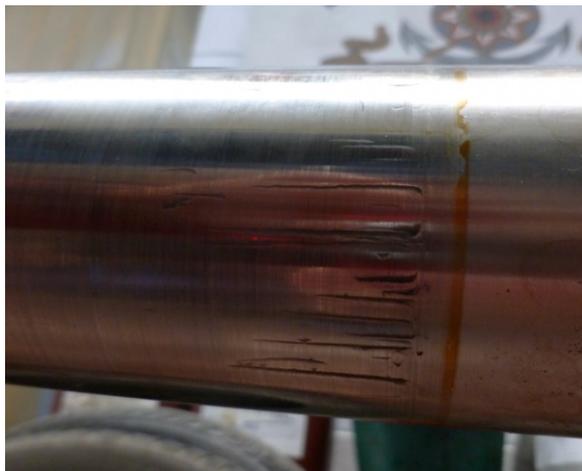
### Corrosion d'un système de propulsion sur un bateau

- ▶ Coque en époxy
- ▶ Arbres en inox 17-4 PH
- ▶ Hélices en bronze

Protégés par un antifouling et une PC zinc

# CAS CONCRET

## ANALYSES MORPHOLOGIQUES



Corrosion de l'arbre sous l'hélice, sous les bagues hydrolubles et dans le tube d'étambot

Corrosion caverneuse et corrosion par piqûres

# CAS CONCRET

## MESURE DE POTENTIELS

Etat électrique de la vedette	Potentiel (mV/Ag/AgCl/eau de mer)Bâbord	Potentiel (mV/Ag/AgCl/eau de mer)Tribord
Coupure complète	-780	-810
Alimentation directe batterie démarrage + incendie	-780	-800
Coupe batterie démarrage bâbord	-790	-810
Coupe batterie démarrage tribord	-780	-800
Contact moteur bâbord	-780	-800
Contact moteur tribord	-780	-800
Démarrage moteur bâbord	-780	-800
Démarrage moteur tribord	-780	-800
Deux moteurs	-780	-815
Batterie démarrage + batterie servitude	-780	-800
Batterie démarrage + batterie servitude+ radio	-780	-800
Démarrage complet bâbord	-795	-800
Démarrage complet tribord	-795	-800
A quai	-840	-840



Absence de  
courants de  
fuite

# CAS CONCRET

## HYPOTHESES

### Corrosion sur arbre:

- ▶ Protection cathodique insuffisante?
- ▶ Apparition du phénomène pendant le laps de temps où il n'y avait plus d'anodes?

### Surconsommation des anodes:

- ▶ Mauvais dimensionnement des anodes notamment en début de vie?
- ▶ Demande en courant plus forte due à des désordres?

## CAS CONCRET



*Zone d'implantation des embases en très mauvais état*

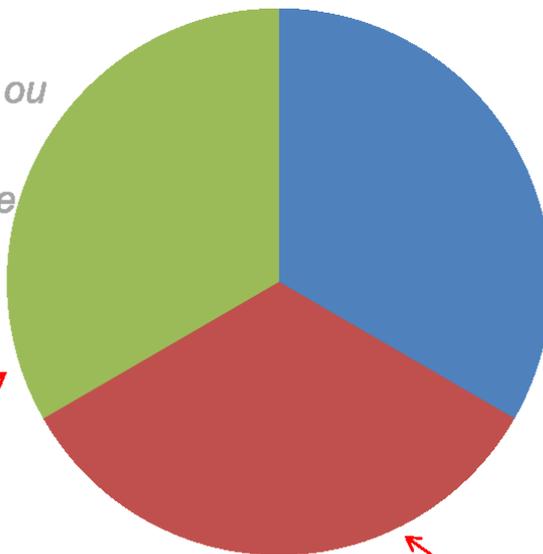
*Surface métal nu non prévue dans le dimensionnement = Demande en courant plus importante*

# CONCLUSION

## Origines de la corrosion issues des Analyses de défaillances CETIM

### Utilisation:

- ▶ Procédé non conforme ou modifié
- ▶ Procédure de nettoyage



### Conception:

- ▶ Choix des matériaux
- ▶ Géométrie, Forme



### Fabrication:

- ▶ Soudage
- ▶ Mise en forme: pliage, emboutissage, cintrage, ...



MERCI POUR VOTRE ATTENTION