

DEGRADATION PAR CORROSION

- **TYPES ET MORPHOLOGIE DES DEGRADATIONS PAR CORROSION**
- **CORROSION CHIMIQUE ET OXYDATION**
- **CORROSION ELECTROCHIMIQUE**
- **PROTECTION ET LUTTE CONTRE LA CORROSION**
- **RESISTANCE A LA CORROSION DES MATERIAUX NON METALLIQUES**
- **ETUDE DE CAS : PROTECTION DES PIPELINES SOUTERRAINS**
MATERIAUX POUR TOITURE
POTS D'ECHAPPEMENT D'AUTOMOBILES

DEGRADATIONS PAR CORROSION

INTRODUCTION

- **Corrosion** : dégradation d'un matériau sous l'action d'agents atmosphériques ou chimiques
- **Exemple** : rouille des aciers ordinaires en atmosphère humide
- **Intérêt de l'étude de la corrosion**
 - Dépenses considérables dues aux dégradations par corrosion et aux moyens de lutte contre elles
 - \cong le quart de la production mondiale d'acier détruit par la corrosion



DIZAINES DE MILLIARDS DE DOLLARDS

TYPES DE DEGRADATIONS PAR CORROSION

- **Cause de la corrosion**

- Matériau métallique : élaboré artificiellement par l'homme et se trouve sous forme de composés chimiques dans le minerai (oxydes, sulfures, ...)
- Corrosion : tendance du matériau à retourner à son état originel dans le minerai

- **Corrosion chimique**

- Réaction purement chimique entre la surface du matériau et un gaz ou un liquide non électrolyte
- Exemple : oxydation de l'acier (attaque par l'oxygène à haute température)

- **Corrosion électrochimique**

- Réaction électrochimique \Rightarrow circulation de courant électrique à la surface du matériau
- Exemple : attaque de l'aluminium par l'acide sulfurique

- **Corrosion biochimique**

- Sécrétion d'acide par les bactéries \Rightarrow attaque du métal
- Type de corrosion rencontré dans les réservoirs et les conduites enterrées

MORPHOLOGIE DES DEGRADATIONS PAR CORROSION

ETATS D'UN METAL DANS UN MILIEU CORROSIF

- **Etat d'immunité**

- Le métal ne se corrode pas, il est thermodynamiquement stable
- Etat rencontré pour les métaux nobles que l'on trouve à l'état pur dans le minerai : or, platine, rhodium, ...
- Etat pouvant être obtenu pour l'ensemble des métaux dans des conditions opératoires particulières (voir protection cathodique)

- **Etat de passivité**

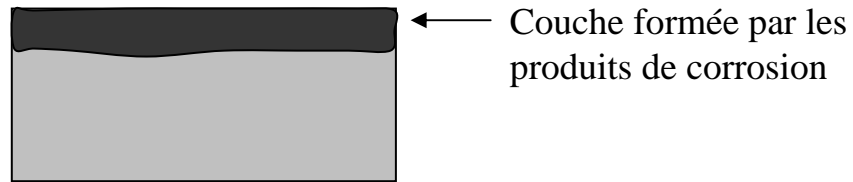
Absence de corrosion liée à la formation d'une mince couche d'oxyde jouant le rôle d'écran entre le métal et le milieu extérieur

- **Etat d'activité**

- Corrosion du métal par le milieu environnant
- Corrosion en milieu aqueux : se manifeste de différentes façons identifiables soit par un examen visuel, soit par un examen microscopique des zones endommagées

- **CORROSION GENERALISEE OU UNIFORME**

- Forme de corrosion la plus courante
- Se traduit par une dissolution uniforme de la surface métallique en contact avec l'agent corrosif
- Métal à l'état actif
- Contrôlable par des mesures de pertes de poids ou de diminution d'épaisseur du métal



Corrosion généralisée

- Exprimée par un **taux de corrosion** (mg ou g par unités de surface et de temps : mg ou g.dm⁻² j⁻¹) ou plus souvent par une **vitesse de corrosion** (diminution d'épaisseur par unité de temps : mm/an)

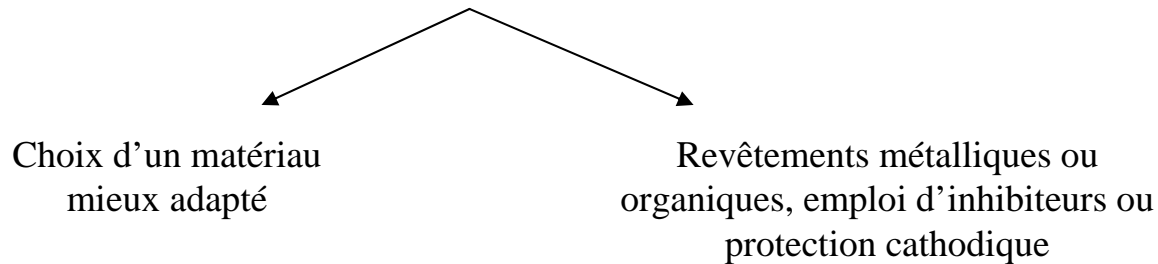
- **Classification du degré de résistance à la corrosion des matériaux métalliques :**

Vitesse de corrosion (mm/an)	Résistance à la corrosion	
< 0.05	Très résistant	TB
< 0.5	Résistant	B
0.5 à 1.0	Peu résistant	AB
> 1.0	Non résistant	M

- Vitesse de corrosion de quelques métaux et alliages dans l'acide propionique concentré à température ambiante :

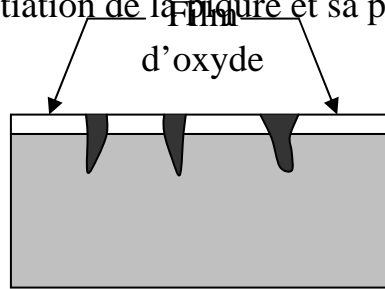
Métal ou alliage	Vitesse de corrosion (mm/an)	Résistance à la corrosion
Acier inoxydable (Ti)	.005	TB
Aluminium	.006	TB
Laiton	.011	TB
Cuivre	.017	TB
Zinc	.060	B
Acier doux	1.30	M

- Protection contre la corrosion uniforme :



• CORROSION PAR PIQURES

- Affecte de préférence les **métaux ou les alliages passivés** : aciers inoxydables ou alliages d'aluminium
- Forme de corrosion particulièrement **destructive** : intéresse une très faible partie de la surface mais conduit à des vitesses de corrosion localisées très élevées (risques de perforations de récipients, tubes, etc.)
- **Processus en deux étapes** : initiation de la piqûre et sa progression au sein du métal



Corrosion par piqûres

- **Initiation de la piqûre** : rupture locale de la couche protectrice (ou film de passivité) liée à un défaut superficiel du métal (un coup d'outil par exemple)
- Une surface rugueuse (dépôts de produits corrosifs plus favorisés) possède une plus grande susceptibilité à la corrosion par piqûres qu'une surface polie
- **Exemple** : fer en solution chlorurée
la formation des produits de corrosion favorise, par acidification locale, la propagation de la piqûre jusqu'à la perforation finale
- **Diamètre des piqûres très faible** \Rightarrow mesure du taux de corrosion par perte de poids inefficace

- **CORROSION PAR COUPLAGE GALVANIQUE**

- **Contact entre 2 métaux différents dans un milieu corrosif :**

différence de potentiel électrochimique \Rightarrow formation d'une pile électrochimique \Rightarrow corrosion du métal le moins noble (anode) et résistance à la corrosion du métal le plus noble (cathode)

- **Exemple :** détérioration rapide d'un ballon d'eau chaude en tôle galvanisée raccordé au circuit de distribution par une tuyauterie en cuivre

- **Conductivité du milieu** $\downarrow \Rightarrow$ résistance au passage du courant galvanique $\uparrow \Rightarrow$ les effets de la corrosion se concentrent sur les zones de contact et disparaissent lorsque l'on s'éloigne de la surface cathodique

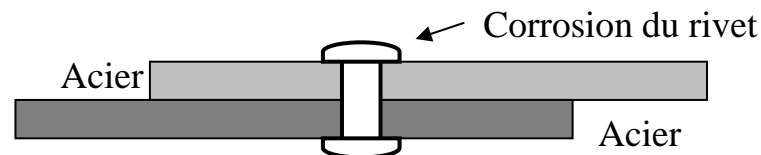
Milieu peu conducteur



Milieu très conducteur



- **Influence de la densité de courant galvanique :** une surface anodique petite devant la surface cathodique entraîne une dégradation rapide du métal actif



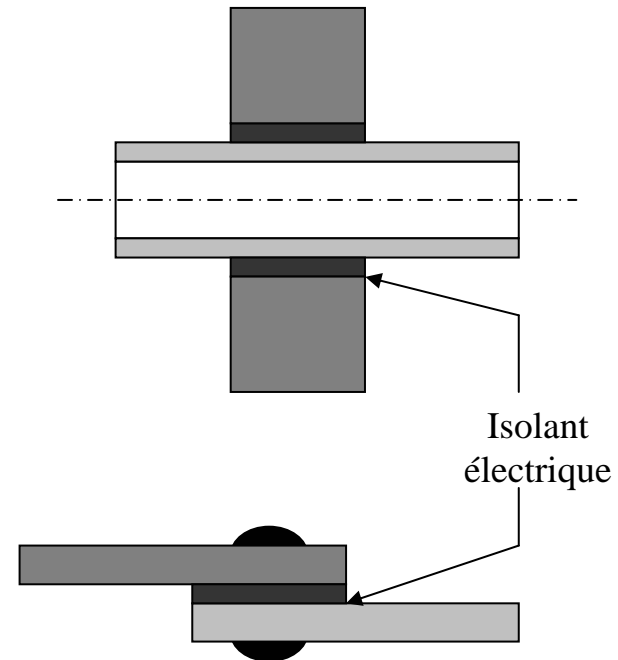
- Protection contre la corrosion galvanique :

Choisir des métaux aussi proches que possible dans la classification galvanique

prévoir une surface anodique supérieure à la surface cathodique

isoler les différents métaux par des joints non conducteurs

utiliser des inhibiteurs de corrosion



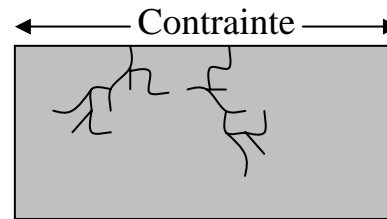
- **CORROSION SOUS CONTRAINTES (SOUS TENSION)**

- **Actions conjuguées de contraintes mécaniques de traction et d'un milieu corrosif**

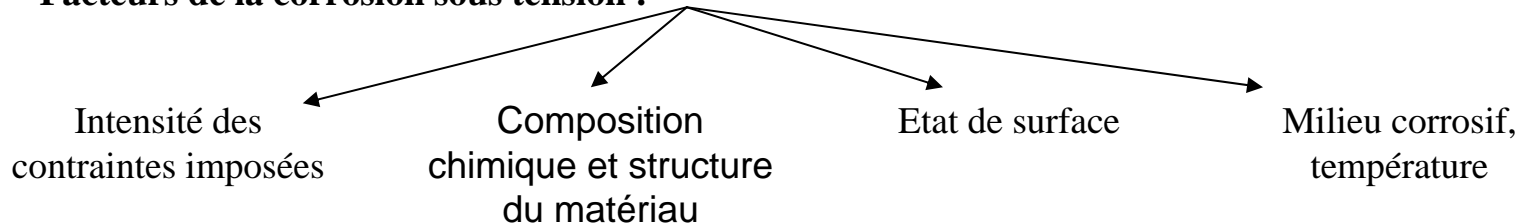
- **Processus en deux phases successives :**

- ⇒ formation d'un défaut local en surface (piqûre)

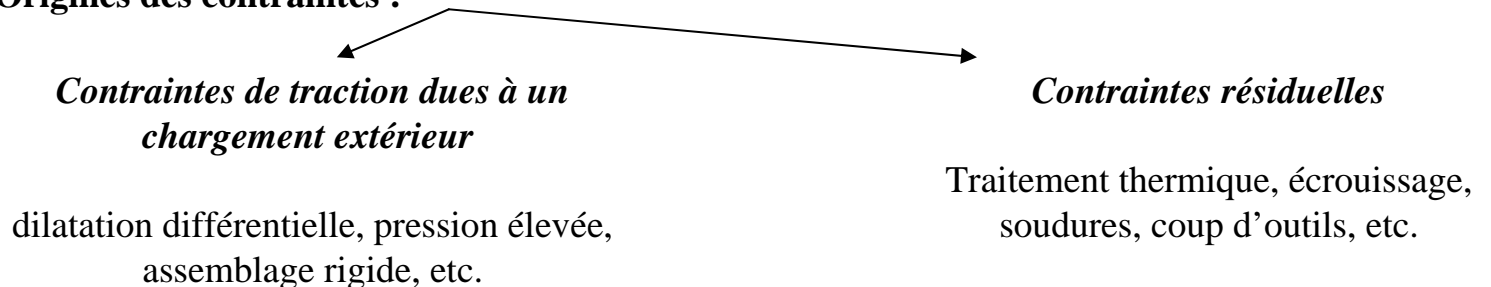
- ⇒ phase de propagation dans laquelle la piquûre devient fissure et progresse jusqu'à la rupture



- **Facteurs de la corrosion sous tension :**



- **Origines des contraintes :**



- **Orientation des fissures** : \perp direction des contraintes

- **Fissures** :

Transgranulaires

Traversant l'intérieur des grains

Intergranulaires

Traversant les joints des grains

- **Pour chaque couple matériau – milieu** : il existe une intensité limite de contrainte localisée en-dessous de laquelle aucune dégradation n'est constatée

- **Modes de prévention** :

Réduction du niveau des contraintes

Détensionnement des contraintes résiduelles

Elimination de l'espèce chimique agressive

Inhibiteurs de corrosion
Protection cathodique

Changement de matériau

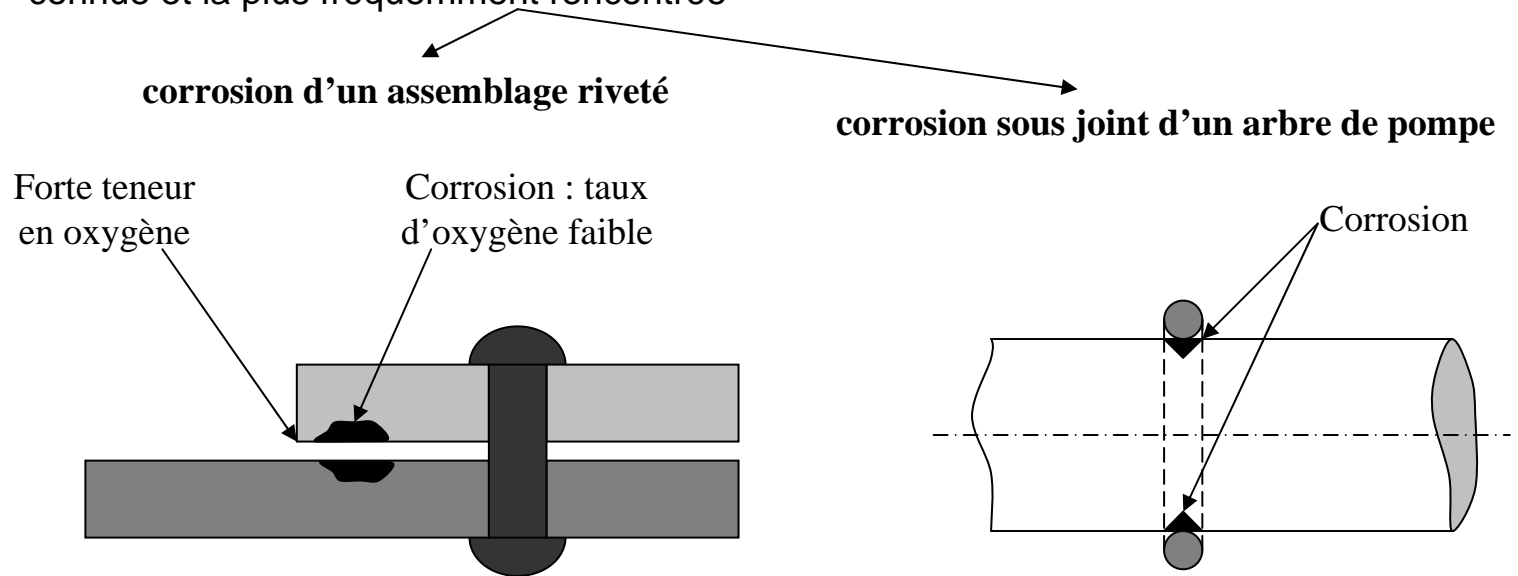
- **Exemples de couples métal – solution** : risques de rupture par corrosion sous contraintes

Métaux et alliages	Milieus
Aciers ordinaires	Solution de soude Solutions de nitrates de calcium, d'ammonium et de sodium (engrais) Mélanges acides (H_2SO_4 , HNO_3) Eau de mer
Aciers inoxydables	Solutions acides chlorurées ($MgCl_2$, $BaCl_2$) Solutions chaudes chlorurées Eau de mer
Cuivre et alliages	Vapeurs et solutions ammoniacales Eau, vapeur d'eau
Aluminium et alliages	Solutions chlorurées Air, vapeur d'eau Eau de mer

- **Cas particulier** : contact des récipients en acier inoxydable avec des solutions chlorurées (certains produits de nettoyage) \Rightarrow corrosion sous tension

- **CORROSION CAVERNEUSE**

- **Résulte de l'hétérogénéité des propriétés physiques ou chimiques de la solution corrosive** : enrichissement local en substances dissoutes (sels, produits de corrosion, gaz, etc.) ou échauffement
- Formation de couples anode – cathode : **piles de concentration**
- **Corrosion caverneuse** : souvent associée à la présence de petits volumes de solution corrosive stagnante (présence de cavités), de surfaces jointives ou de dépôts discontinus
- **Forme localisée de corrosion**
- Peut s'initier par contact de matériaux réalisés dans le même métal ou contact de matériaux métalliques et non métalliques
- **Corrosion caverneuse par " aération différentielle du milieu "** : forme la plus connue et la plus fréquemment rencontrée



- **Autres exemples de corrosion par aération différentielle :**

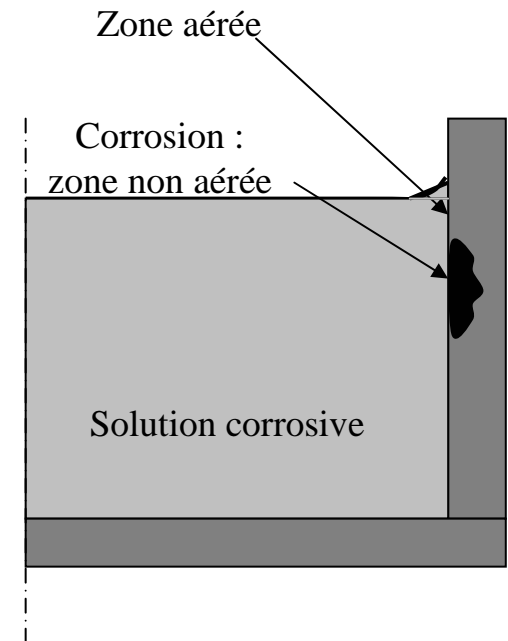
Surface métallique avec dépôt discontinu
(tarte, sable, poussière, ...)

Surface sous-jacente au dépôt : peu
oxygénée \Rightarrow corrodée

Canalisations : écoulement perturbé par
l'accumulation des produits de corrosion

Interface liquide - atmosphère
(cuves de stockage)

Niveau de liquide stagnant



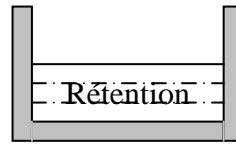
- **Recommandation :** ne pas maintenir un
niveau constant de liquide dans les cuves de
stockage \Rightarrow solution la plus favorable :
conserver les cuves ou pleines, ou vides
(après utilisation)

- **Métaux ou alliages passivables :** bonne tenue à la corrosion due à la présence d'un
agent oxydant \Rightarrow sensibles à la corrosion cavernueuse

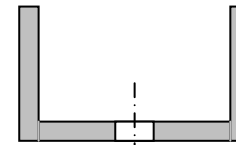
- Lutte contre la corrosion caverneuse :

Conception d'éléments structuraux :

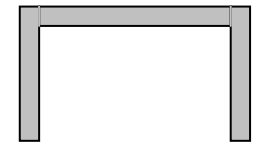
éviter la rétention de solution
corrosive



Mauvais



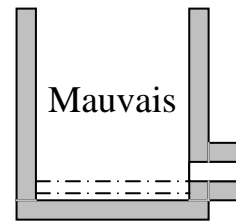
Moyen



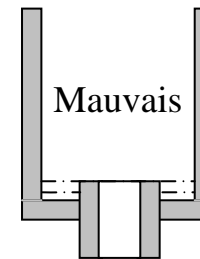
Bon

Réalisation des cuves de stockage :

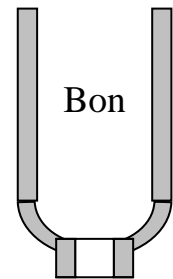
permettre des vidanges complètes



Mauvais



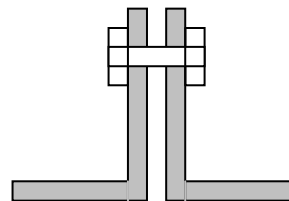
Mauvais



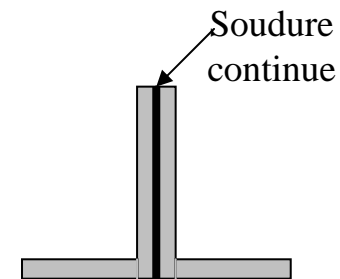
Bon

Assemblages soudés :

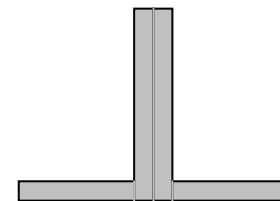
soudure continue bord à
bord préférée aux
assemblages rivetés ou
boulonnés



Mauvais



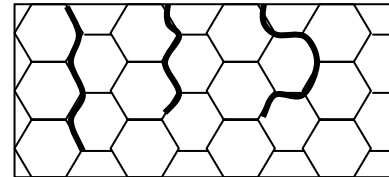
Bon



Excellent

- **CORROSION INTERGRANULAIRE**

- Apparaît dans certains métaux et alliages où les zones contiguës aux joints de grains s'enrichissent ou s'appauvrissent en éléments d'addition de l'alliage ou présentent un taux élevé en impuretés
- **Corrosion intergranulaire** : corrosion préférentielle au niveau des joints de grains (moins nobles que l'intérieur des grains)



- **Type de corrosion dangereux** : réduit de façon catastrophique la résistance mécanique
- **Corrosion affectant certains aciers inoxydables** : due à l'attaque préférentielle des zones appauvries en chrome par précipitation de carbures de chrome aux joints de grains au cours d'opérations thermiques (traitement thermique, soudage, etc.)
- **Alliages d'aluminium à haute résistance** : sensibles à la corrosion intergranulaire, causée par la précipitation aux joints de grains de certains composés souvent plus nobles que la matrice
- **Lutte contre la corrosion intergranulaire** :

← Traitement thermique approprié, qui resolubilise les composés (carbure de chrome par exemple) responsables de la dégradation du métal

→ Utilisation d'aciers inoxydables stabilisés au titane ou niobium plus carburigènes que le chrome

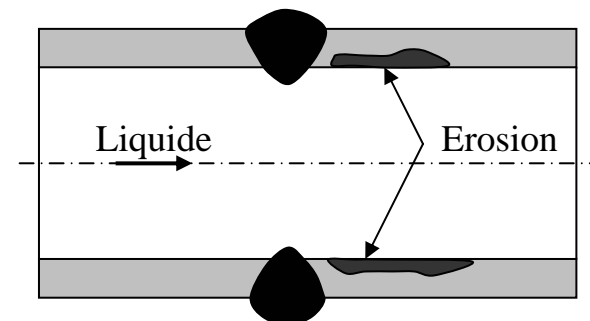
- **CORROSION SELECTIVE**

- **Dissolution préférentielle d'un ou plusieurs constituants d'une solution solide d'un alliage métallique**
- **Dézincification des laitons** : se manifeste par une dégradation de la peau de l'alliage qui devient poreuse et perd toute résistance mécanique \Rightarrow aspect rougeâtre de la surface dû à la dissolution ou à la précipitation, par le milieu corrosif, du zinc contenu dans le laiton
- **Désaluminisation** : mécanisme affectant les alliages Cu - Al en contact avec de l'eau de mer ou des eaux polluées
- **Graphitisation des fontes grises** : le graphite, plus noble que le fer, accélère la dissolution de celui-ci par couplage galvanique et demeure en surface sous forme d'une couche grisâtre, poreuse et très facilement dégradable
- La graphitisation se produit généralement après immersion des fontes grises dans des solutions faiblement corrosives : l'eau potable par exemple

- **EROSION - CORROSION**

- **Cas de déplacement rapide d'un fluide sur une surface métallique** : arrachement mécanique des oxydes ou des produits de corrosion constituant éventuellement un écran protecteur \Rightarrow corrosion plus rapide que celle si le fluide était immobile
- **Erosion – corrosion** : affecte l'ensemble des métaux et alliages, en particulier les métaux passivables et les métaux de faible dureté
- **Faciès d'érosion – corrosion** : cratères ou piqûres orientés dans des directions privilégiées bien souvent parallèles au sens d'écoulement de la solution corrosive
- **Résistance à l'érosion – corrosion des métaux passivables** : dépend de la rapidité de reconstitution des couches protectrices
- **Eviter la création d'obstacles à l'écoulement du liquide** : ces obstacles créent des turbulences et deviennent les parties vulnérables de l'installation
- **Exemples d'obstacles** : cordons de soudure, coudes à courbure élevée

- **Exemple** : érosion - corrosion due à des turbulences produites par les cordons de soudure



- **CAVITATION - CORROSION**

- **Résulte de l'action simultanée de la corrosion et de la cavitation**

- **Cavitation** : due à l'implosion de bulles de vapeur présentes dans le liquide, et a pour effet de détruire les couches protectrices et le métal sous-jacent (surpressions de quelques centaines de bars)

- **Méthodes de prévention de la cavitation - corrosion :**

Eviter les différences de pression trop importantes dans les écoulements

Diminuer la rugosité du métal qui favorise l'apparition de bulles

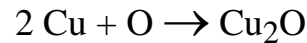
Protéger cathodiquement le métal

Choix d'un revêtement ductile
Ajout d'inhibiteurs si c'est possible

CORROSION CHIMIQUE - OXYDATION

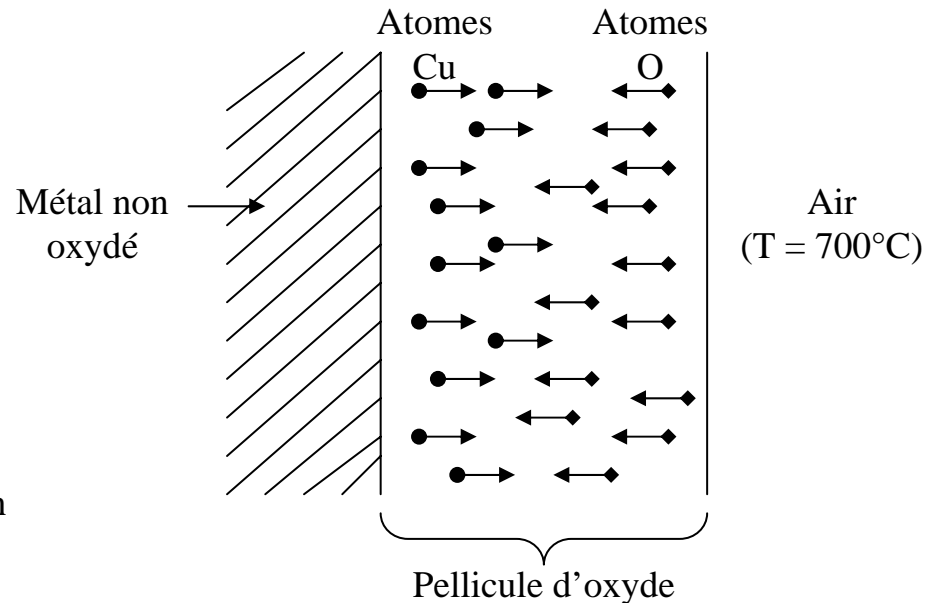
MECANISME

- **Corrosion chimique** : interaction chimique du métal et du milieu ambiant ne faisant pas intervenir le passage de courant électrique à la surface du métal
- **Exemple étudié** : oxydation du cuivre dans l'air à 700°C



- **Etapes** :

- Adsorption des molécules d'oxygène sur la surface du cuivre
- Dissociation des molécules d'oxygène : $\text{O}_2 \rightarrow 2 \text{O}$
- Diffusion bilatérale des atomes d'oxygène et de cuivre
- Combinaison de Cu et O \Rightarrow autoprotection du métal contre l'oxydation

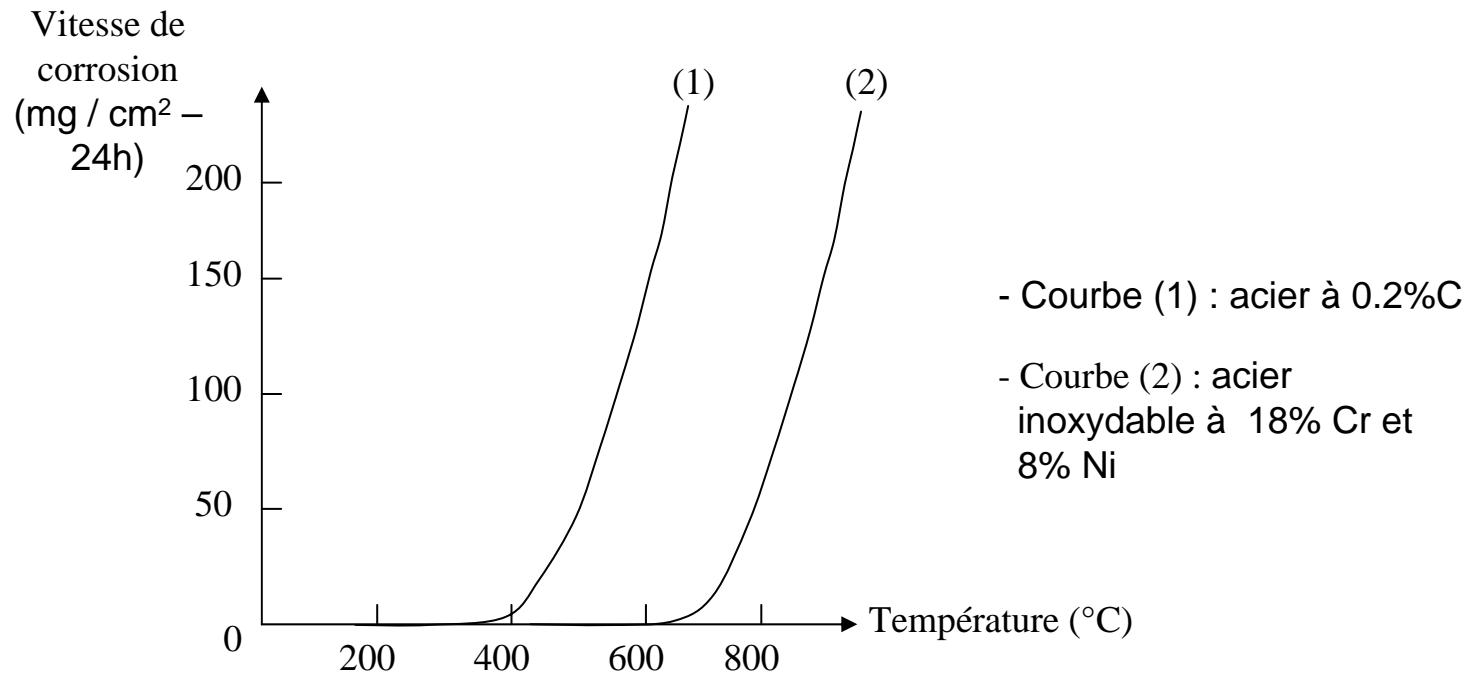


- **Vitesse d'oxydation :**

- Epaisseur de la couche d'oxyde $\uparrow \Rightarrow$ distance à parcourir par les atomes Cu et O pour se rencontrer $\uparrow \Rightarrow$ Vitesse d'oxydation \downarrow
- Epaissement de la couche d'oxyde = autoprotection du métal contre l'oxydation

FACTEURS DE LA CORROSION CHIMIQUE

- **Influence de la température :** vitesse de corrosion \uparrow exponentiellement en fonction de T

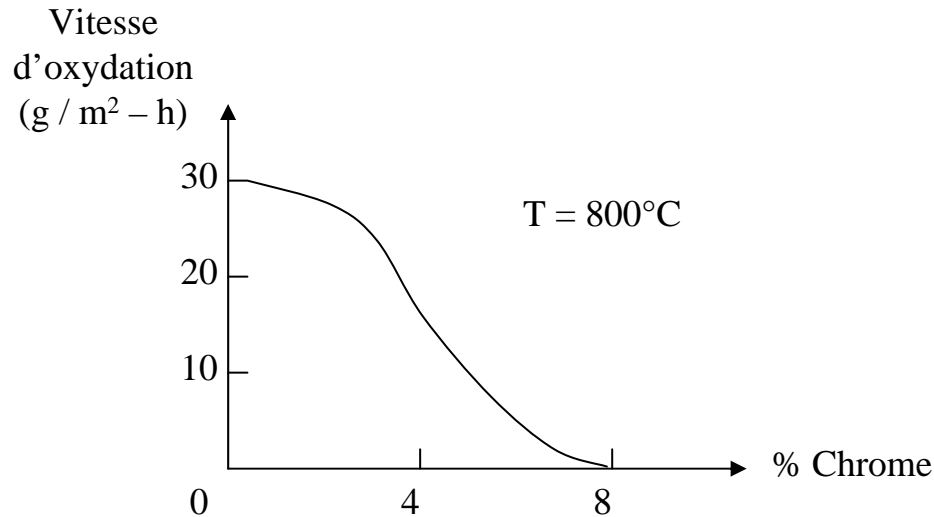


- **Influence de l'agent corrosif**

- La vitesse de corrosion chimique dépend de la nature de l'agent corrosif
- **Exemple** : Ni résiste à l'oxydation jusqu'à $\cong 800^{\circ}\text{C}$
Ni fortement attaqué par SO_2 ou H_2S

- **Influence de la nature du matériau**

- La vitesse de corrosion chimique dépend de la composition chimique et de la structure du matériau
- **Exemple** : influence du %Cr d'un acier sur la vitesse d'oxydation
 $\% \text{Cr} \uparrow \Rightarrow$ formation d'une couche de Cr_2O_3 très dense et imperméable à l'oxygène

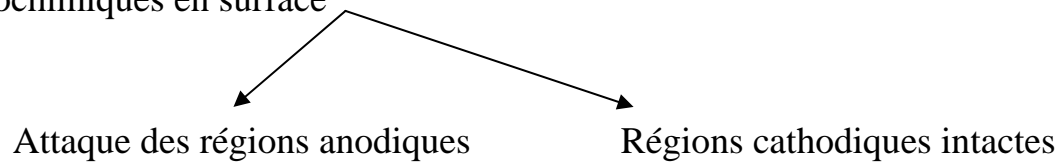


CORROSION ELECTROCHIMIQUE

MECANISMES

- **Apparition de la corrosion électrochimique**

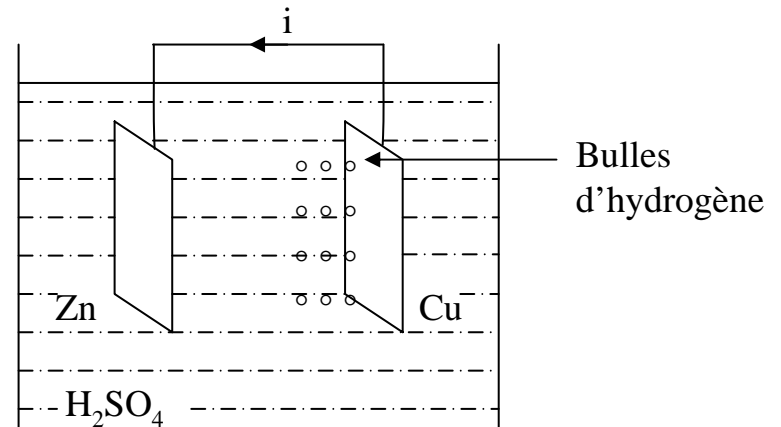
Matériau métallique en contact avec un liquide électrolyte (présence d'ions) \Rightarrow formation de piles électrochimiques en surface



- **Pile électrochimique**

- Zn = anode \Rightarrow dissous

- Cu = cathode \Rightarrow non attaqué
dégagement de H_2

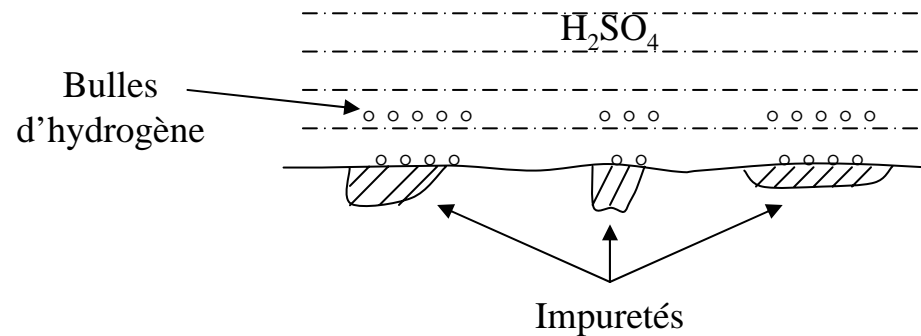


- **Tôle de zinc en contact avec H_2SO_4**

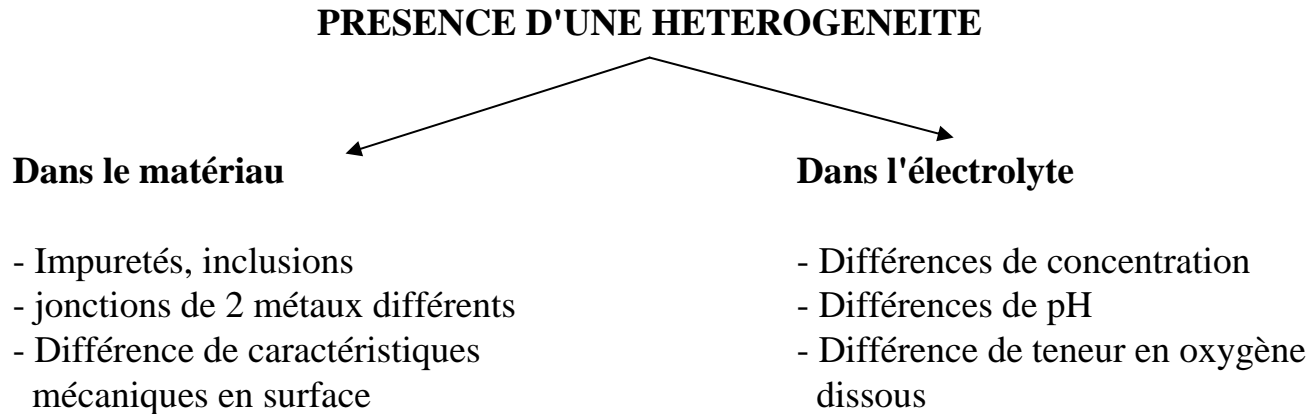
- Analogie avec la pile électrochimique
- Dégagement de H_2 en certains points (exemple : inclusions de cuivre débouchant en surface)
- Dissolution du zinc



Tôle de zinc = complexe d'un grand nombre de micropiles en court-circuit dont le fonctionnement provoque l'attaque du zinc (anode) et un dégagement de H_2 sur les cathodes



- **Conditions d'apparition des piles électrochimiques :**

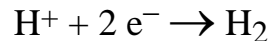


- **Processus de dissolution du zinc :**

- Zn en contact de l'acide sulfurique H_2SO_4
- Régions anodiques : le zinc passe en solution sous forme de Zn^{++}



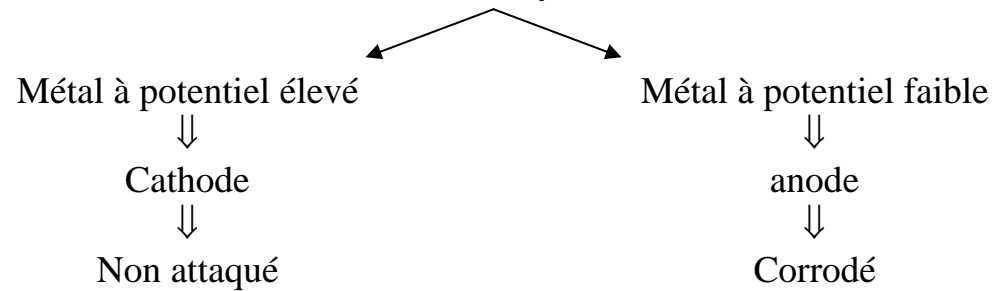
- Régions cathodiques : dégagement d'hydrogène



➡ Circulation de courant électrique des cathodes aux anodes

- **Potentiel électrochimique**

- Potentiel pris par un métal en contact d'un électrolyte
- Mesuré à l'aide d'une électrode de référence : au calomel saturé ou à l'hydrogène
- Tableaux de potentiels électrochimiques des matériaux métalliques
- Pour chaque tableau : agent corrosif et conditions opératoires fixés (concentration, température, pH, ...)
- Jonction de 2 métaux différents en contact d'un électrolyte :



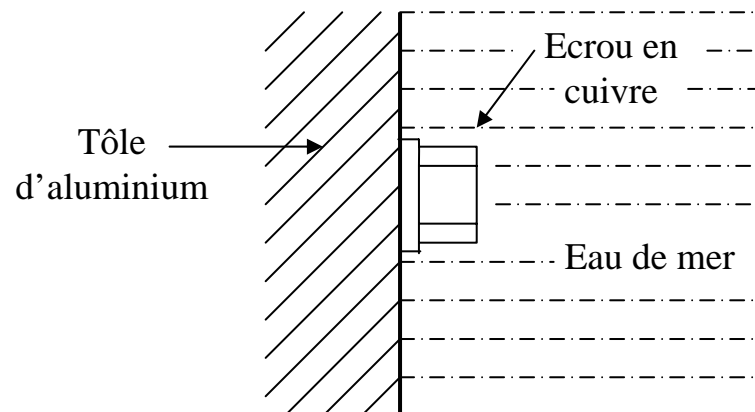
- **Exemple** : tôle d'aluminium en contact d'un écrou en cuivre dans l'eau de mer

- Ecrou de cuivre = cathode

⇒ non corrodé

- Tôle d'aluminium = anode

⇒ corrodée



FACTEURS DE LA CORROSION ELECTROCHIMIQUE

- **Concentration de l'électrolyte**

- Dans certains cas : vitesse de corrosion \uparrow quand la concentration de l'électrolyte \uparrow

- Exemple** : zinc en contact de l'acide nitrique

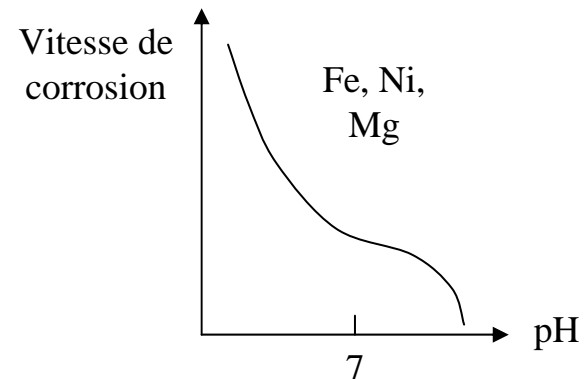
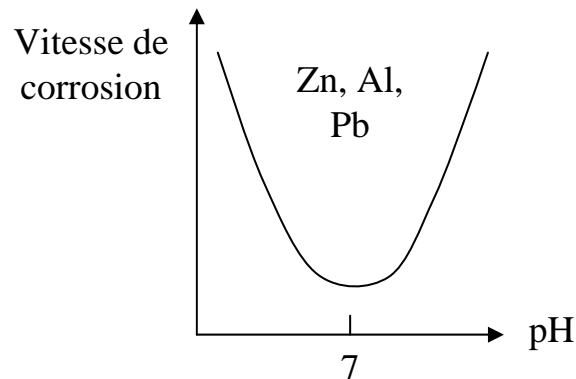
- Dans d'autres cas : vitesse de corrosion \downarrow quand la concentration de l'électrolyte \uparrow

- Exemple** : fer en contact de l'acide nitrique très concentré \Rightarrow passivation du fer \Rightarrow pas de corrosion

- **pH de l'électrolyte**

- Influence du pH sur la vitesse de corrosion : complexe

- Types de variations de la vitesse de corrosion en fonction du pH :



- **Température**

- En général : vitesse de corrosion \uparrow quand $T \uparrow$
- Dans certains cas : vitesse de corrosion \downarrow quand $T \uparrow$ (cas où T influe d'autres facteurs, comme la nature des produits de corrosion)

- **Teneur en oxygène dissous**

- Vitesse de corrosion \uparrow quand la teneur en oxygène dissous \uparrow
- **Exemple** : rouille d'un acier ordinaire en contact de l'eau (présence d'oxygène dissous), pas de rouille en contact de l'eau distillée et désoxygénée maintenue à l'abri de l'air

- **Etat de surface**

- Présence d'aspérités en surface des métaux \Rightarrow surface réelle de contact avec l'électrolyte \uparrow
- Rugosité $\uparrow \Rightarrow$ vitesse de corrosion \uparrow

- **Nature du matériau métallique**

- Influence de la composition chimique sur la vitesse de corrosion
- **Exemple** : corrosion par l'eau de mer d'un acier au carbone, pas d'attaque d'un acier inoxydable austénitique

- **Sollicitations mécaniques : corrosion sous contrainte**

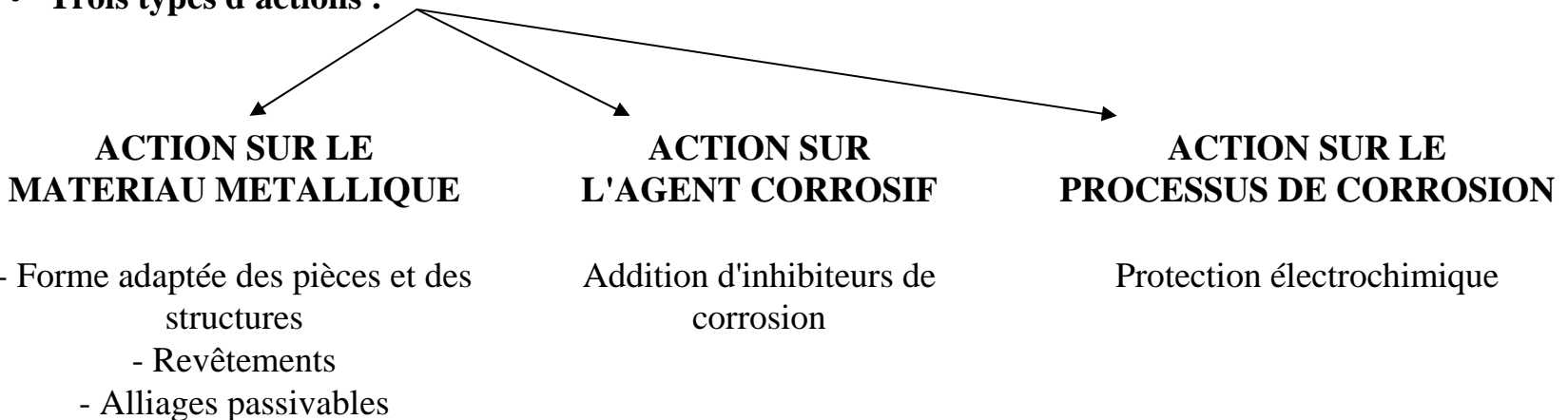
- Progression des fissures même à $K < K_c$ (exemple : acier ordinaire sollicité et en contact avec la soude)
- La corrosion augmente la vitesse de propagation des fissures de fatigue (exemple : la contrainte qui conduit à $N_R = 5 \times 10^7$ cycles est divisée par 4 pour un acier ordinaire dans l'eau salée)

PROTECTION ET LUTTE CONTRE LA CORROSION

INTRODUCTION

- Lois de dégradation par corrosion mal connues + influence de plusieurs facteurs \Rightarrow seule l'expérience permet d'estimer la vitesse de corrosion
- **Problème de corrosion :**
Analyse des conditions d'apparition \Rightarrow actions correctives ou préventives de lutte contre la corrosion

- **Trois types d'actions :**



ACTION SUR LE MATERIAU METALLIQUE

PREVENTION PAR UNE FORME ADAPTEE DES PIECES ET DES STRUCTURES

- Conception de formes adaptées pour les pièces et les structures \Rightarrow diminution des risques de corrosion
- **Corrosion atmosphérique :**
Ne se produit qu'en présence d'humidité \Rightarrow prévoir un bon drainage pour éviter une accumulation d'humidité \Rightarrow diminuer ainsi les risques de corrosion
- **Génie civil et architecture :**
 - Certains éléments de structures métalliques sont exposés périodiquement aux eaux de pluie
 - Prévoir un drainage de ces eaux \Rightarrow réduire les problèmes de corrosion atmosphérique
- **Industrie chimique :**
Assurer une vidange complète des récipients de toutes sortes pendant la phase de non-utilisation
- **Forme des pièces mécaniques :**
 - Influe sur la distribution des contraintes \Rightarrow influe sur la sensibilité à la corrosion sous contrainte
 - Exemple : prévoir une forme arrondie au niveau de la tête d'un boulon \Rightarrow éviter une concentration de contraintes trop élevée \Rightarrow diminuer les risques de corrosion sous tension

- **Corrosion caverneuse :**

- Apparaît dans les fentes et autres endroits inaccessibles par formation de piles d'aération
- Exemple : une fente peut provenir d'un joint mal dimensionné
- Emploi de pièces soudées préférable à celui d'assemblages vissés ou rivetés

- **Corrosion galvanique :**

- Contact électrique et électrolytique entre des métaux différents \Rightarrow formation de piles galvaniques \Rightarrow corrosion accélérée du métal le moins noble

- Séparer les métaux différents par un isolant ou les noyer dans un polymère isolant (protection des composants électroniques \Rightarrow éviter ce type de corrosion)

- Installations de taille importante : isolation électrique pas toujours possible des différents métaux \Rightarrow emploi de pièces sacrificielles (peu coûteuses et facilement remplaçables)

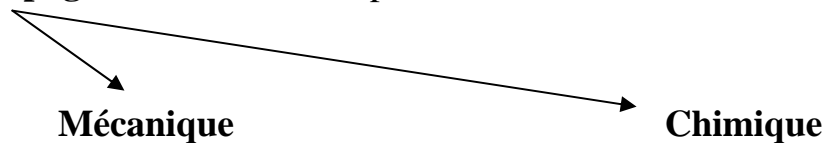
PROTECTION PAR REVETEMENTS

PRINCIPE

- Utilisation d'un matériau métallique peu coûteux (en général un acier ordinaire) + revêtement anticorrosion isolant le matériau de l'agent corrosif
- Plusieurs types de revêtements peuvent être utilisés : peintures, matières plastiques, revêtements métalliques
- Préparation soignée de la surface avant l'application du revêtement : nettoyage, décapage

PREPARATION DE LA SURFACE

- **Nettoyage** : utilisation de solvants chlorés \Rightarrow enlèvement de graisses et de saletés
- **Décapage** : enlèvement des produits de corrosion antérieurs (rouille, oxydes, ...) \Rightarrow surface propre



- Brossage (brosses métalliques)
- Sablage, grenailage

Acides : HCl, H₂SO₄, ...

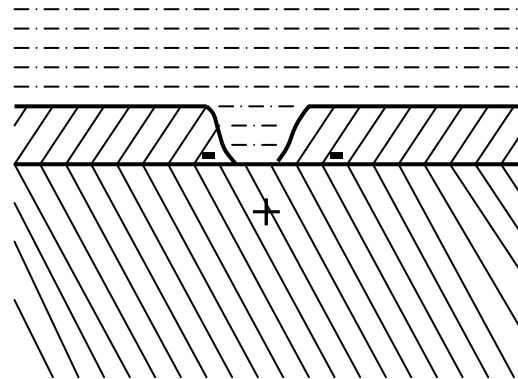
REVETEMENTS METALLIQUES

UTILISATION COURANTE : protection de l'acier contre la corrosion atmosphérique + aspect esthétique

DEUX TYPES : revêtements anodiques - revêtements cathodiques

REVETEMENTS ANODIQUES

- Métal de revêtement **plus électronégatif** que le métal à protéger
- **Exemple** : revêtement de Zn, Cd, Sn ou Al appliqué sur un acier
- **En présence de défauts dans le revêtement** (pores, fissures) \Rightarrow revêtement = anode - métal de base = cathode

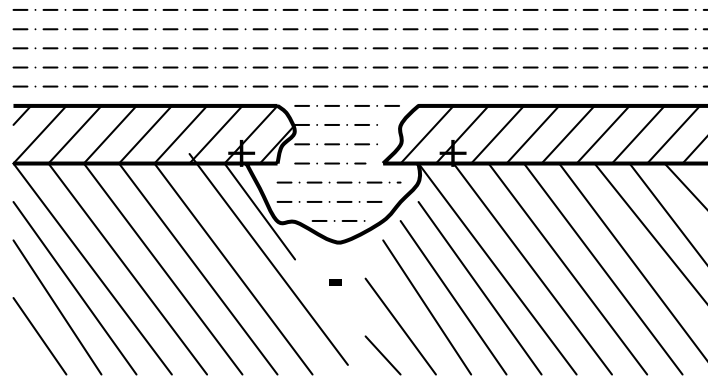


↓
Corrosion du revêtement
Protection du substrat

- **Durée de vie d'un revêtement anodique** : proportionnelle à l'épaisseur du revêtement et dépend de la présence de défauts
- **Exemple** : un revêtement de zinc de 0.15 mm d'épaisseur et bien appliqué sur un acier galvanisé est corrodé en 15 ans

REVETEMENTS CATHODIQUES

- Métal de revêtement **moins électronégatif** que le métal à protéger
- **Exemple** : revêtement de Cr, Ni ou Cu appliqué sur un acier
- **En présence de défauts dans le revêtement** (pores, fissures) \Rightarrow **revêtement = cathode - métal de base = anode**

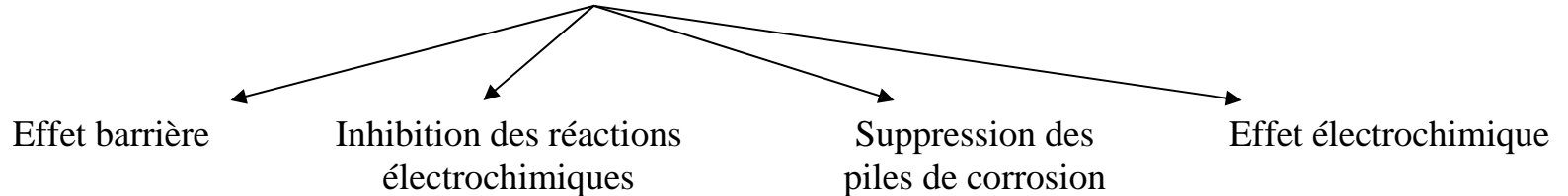


Corrosion du substrat
Protection du revêtement

- Nécessité d'appliquer un **revêtement parfait** sans aucun défaut, sinon corrosion accélérée du métal à protéger

PROTECTION DES METAUX PAR LES PEINTURES

MECANISMES DE PROTECTION



EFFET BARRIERE

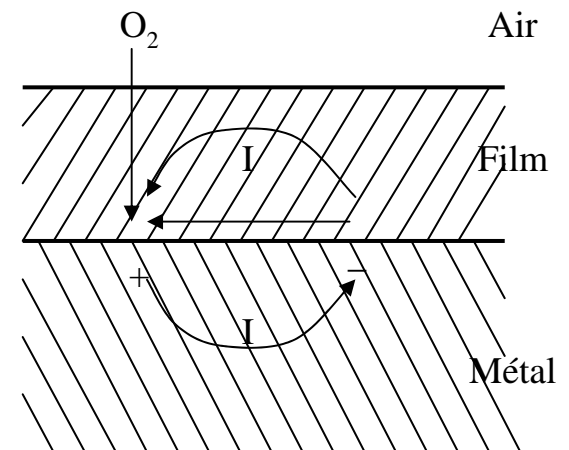
- **Films polymériques** : barrière entre le métal et le milieu corrosif
- **Efficacité de la protection** : si imperméabilité aux agents corrosifs et absence de défauts
- **Cas général** : présence de défauts, \pm imperméables à l'eau et à l'oxygène
- **Perméabilité** : vitesse de diffusion d'une espèce chimique à travers une peinture
- **↓ perméabilité** : ↓ défauts et ↓ diffusion (\uparrow épaisseur + ajout de poudre (TiO_2))
- **Effet barrière** : si imperméabilité des peintures vis-à-vis des anions et des gaz polluants
 - ⇒ pas de formation d'électrolyte avec les cations provenant de la dissolution
 - ⇒ protection même s'il y a perméabilité à l'eau et à l'oxygène

INHIBITION DES REACTIONS ELECTROCHIMIQUES

- **Pigments oxydants (Pb_3O_4 ou ZnCrO_4)** : inhibiteurs de corrosion et facilitent la passivation du substrat s'ils sont en contact avec la surface métallique
 - **Formation de précipités peu solubles :**
 - Exemple : les tannins forment des complexes avec Fe^{2+} et Fe^{3+}
- ⇓
- Diminution de la surface réactive \Rightarrow \downarrow vitesse de corrosion des aciers

SUPPRESSION DES PILES DE CORROSION

- **Influence du fonctionnement des micropiles de corrosion par la peinture**
- **Exemple : pile d'aération en présence d'un film de peinture**
 - Passage du courant ionique entre l'anode et la cathode le long de l'interface peinture – métal ou dans la peinture
 - Peinture bien adhérente au substrat \Rightarrow \downarrow courant ionique \Rightarrow \downarrow vitesse de corrosion
 - Faible conductivité de la peinture \Rightarrow \downarrow courant ionique \Rightarrow \downarrow vitesse de corrosion
 - Peinture efficace si sa résistivité entre 10^{13} et 10^{15} ohm/m²



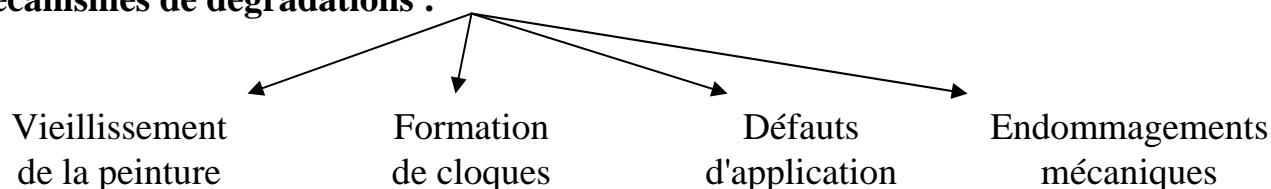
PROTECTION PAR EFFET ELECTROCHIMIQUE

- **Peintures au zinc**
 - **Constitution** : plus de 90% de poudre de zinc mélangée à une résine organique
 - **Utilisation** : couches primaires pour protéger l'acier contre la corrosion
 - **Mécanisme de protection** : semblable à celui des revêtements en zinc métallique
 - **Protection par effet galvanique** : en présence de défauts dans le film, le zinc se corrode à la place de l'acier
 - **Corrosion atmosphérique du zinc** \Rightarrow produits de réaction volumineux (oxydes, carbonates, ...) qui peuvent boucher les pores dans la couche de peinture et induire un effet barrière

DURABILITE DES PEINTURES

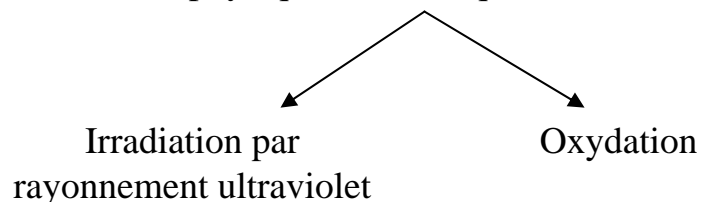
- **Dégradation du film de peinture** ⇒ risque de corrosion du métal

- **Mécanismes de dégradations :**



- **VIEILLISSEMENT DES PEINTURES**

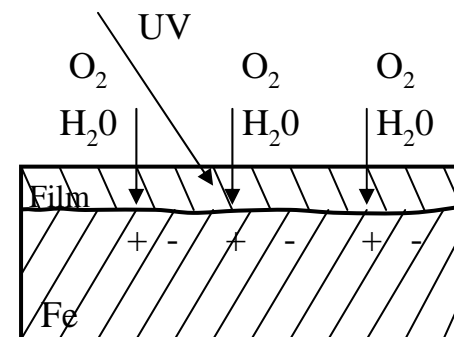
- **Causes :** effets physiques et chimiques du milieu



- **Effets :** les films de peinture deviennent friables et se dégradent facilement par abrasion ou fissuration



Création de défauts
Formation de piles d'aération



- **FORMATION DE CLOQUES**

- **Cause fréquente** : phénomène osmotique

- **Film** = membrane semi-perméable : laisse passer l'eau et non les composants ioniques

- **Pression osmotique** : causée par les contaminants ioniques situés à l'interface métal - film en présence d'eau de condensation



Flux d'eau à travers le film de l'extérieur vers l'intérieur



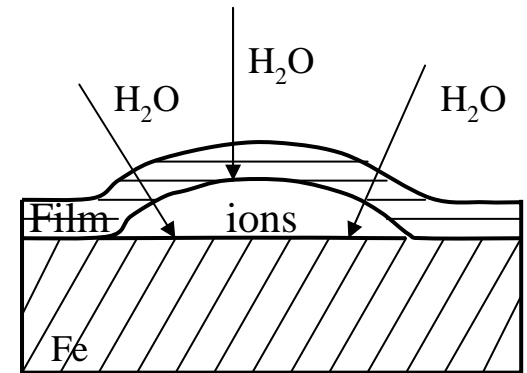
Formation d'une cloque et sa croissance



Rupture à la cloque



Contact direct du métal avec le milieu ⇒ corrosion



- **Contaminants ioniques à l'interface métal – film** : proviennent en général d'un nettoyage insuffisant de la surface du substrat avant l'application de la peinture

- **DEFAUTS D'APPLICATION**

- Défauts d'application (porosité) ou endommagements mécaniques de la peinture (rayures)



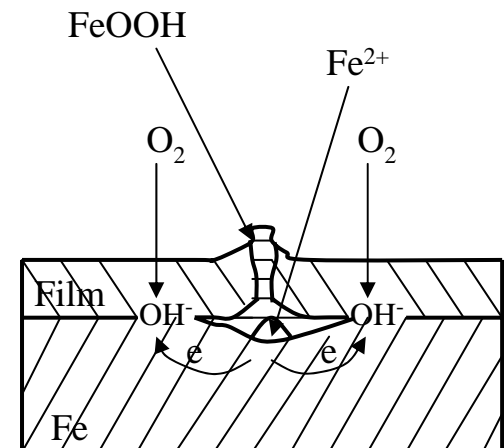
Formation de piles de corrosion



Décollement cathodique de la peinture

- Défaut dans la peinture ⇒ contact direct entre l'acier et le milieu ⇒ formation de rouille ⇒ accès de l'oxygène à la surface du métal ↓ ⇒ Défaut = anode

- Réduction de l'oxygène sous la peinture (réaction partielle cathodique) ⇒ augmentation du pH à l'interface métal – peinture ⇒ décollement de la peinture (décollement cathodique)



- Phosphatation ou peinture résistant en milieu alcalin ⇒ ↓ risque de décollement cathodique

EMPLOI DE METAUX PASSIVABLES

PASSIVATION

Formation d'une couche protectrice spontanément pour certains matériaux métalliques dans de nombreux milieux corrosifs



Passivation = autoprotection du matériau contre la corrosion

ACIERS INOXYDABLES

- **DEFINITION**

- Aciers inoxydables = alliages Fe - C - Cr ou Fe - C - Cr - Ni (+ Mo, Cu, Ti, Si, Nb, ...)
- Condition de passivation : % Cr \geq 12 %

- **ACIERS INOXYDABLES MARTENSITIQUES**

- Composition : 12 à 18 % Cr - 0.1 à 1 % C
- Exemples : Z 20 C13, Z 40 C14
- Structure martensitique très dure
- Résistance à la corrosion : HNO₃, acides organiques
- Résistance moyenne dans l'air humide et l'eau de mer
- Exemples d'utilisation : coutellerie, soupapes, ressorts, billes de roulement

- **ACIERS INOXYDABLES FERRITIQUES**

- Composition : 15 à 30 % Cr - % C < 0.4 %
- Exemple : Z 8 C 17
- Structure ferritique de dureté moyenne
- Résistance à la corrosion : eau de mer, acide nitrique bouillant (25 % < % Cr < 30 %)
- Soudage \Rightarrow formation de carbures de chrome \Rightarrow appauvrissement en chrome au voisinage des grains \Rightarrow corrosion intergranulaire
- Addition de Ti ou de Nb (plus carburigènes que Cr) pour éviter la corrosion intergranulaire
- Exemples d'utilisation : ustensiles ménagers, équipements pour l'industrie alimentaire

- **ACIERS INOXYDABLES AUSTENITIQUES**

- Composition : 17 à 19 % Cr - 8 à 12 % Ni (addition de Ti pour éviter la corrosion intergranulaire)
- Exemple : Z 2 CN 18 - 10
- Structure austénitique de dureté moyenne
- Résistance à la corrosion très bonne, surtout dans les milieux oxydants
- Insensibles à la fragilité à basse température (structure cubique à faces centrées)
- Exemples d'utilisation : industries chimiques, pharmaceutiques et alimentaires
installations frigorifiques

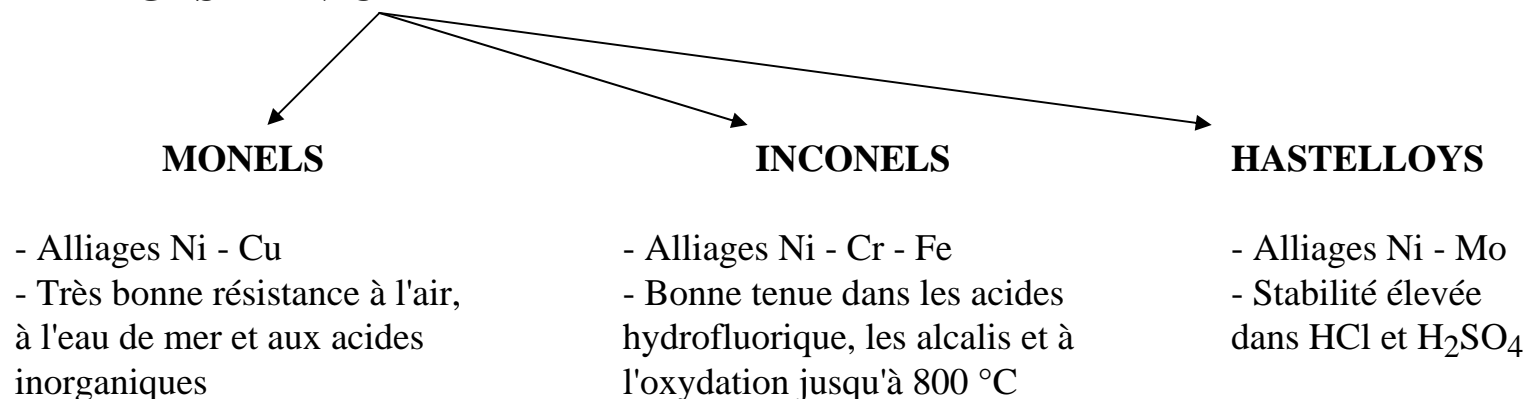
- **ACIERS INOXYDABLES AUSTENO - FERRITIQUES**

- Composition type : 0.05 % C - 20 à 22 % Cr - 8 % Ni - 2.5 % Mo - 1.5 % Cu - 0.5 % Si - 0.5 % Mn
- Structure composée de ferrite et d'austénite
- Propriétés mécaniques remarquables
- Très bonne résistance à la corrosion, surtout sous contrainte

ACIERS HAUTEMENT ALLIES A TENUE ELEVEE AUX ACIDES

- **Composition** : 0.006 % C - 22 à 25 % Cr - 26 à 29 % Ni - 2.5 à 3 % Mo - 2.5 à 3.5 % Cu - 0.5 à 0.9 % N
- Très bonne tenue aux acides, même à chaud
- **Utilisation** : industrie chimique (centrifugeuses, séparateurs, ...)

ALLIAGES DE NICKEL



ALLIAGES DE TITANE

- Très stables dans l'eau, les acides oxydants et les milieux chlorurés
- Exemples d'utilisation : industries du chlore, échangeurs en milieu marin

ALLIAGES DE ZIRCONIUM

- Très facilement passivables, bonne résistance aux acides, même non oxydants, et à la vapeur d'eau jusqu'à 350°C
- Exemple d'utilisation : centrales nucléaires

ALLIAGES D'ALUMINIUM

- Bonne résistance dans les conditions atmosphériques et dans les milieux dont le pH est entre 4 et 9 (formation d'une couche protectrice d'alumine Al_2O_3)
- Susceptibilité à la corrosion intergranulaire et sous tension

TANTALE

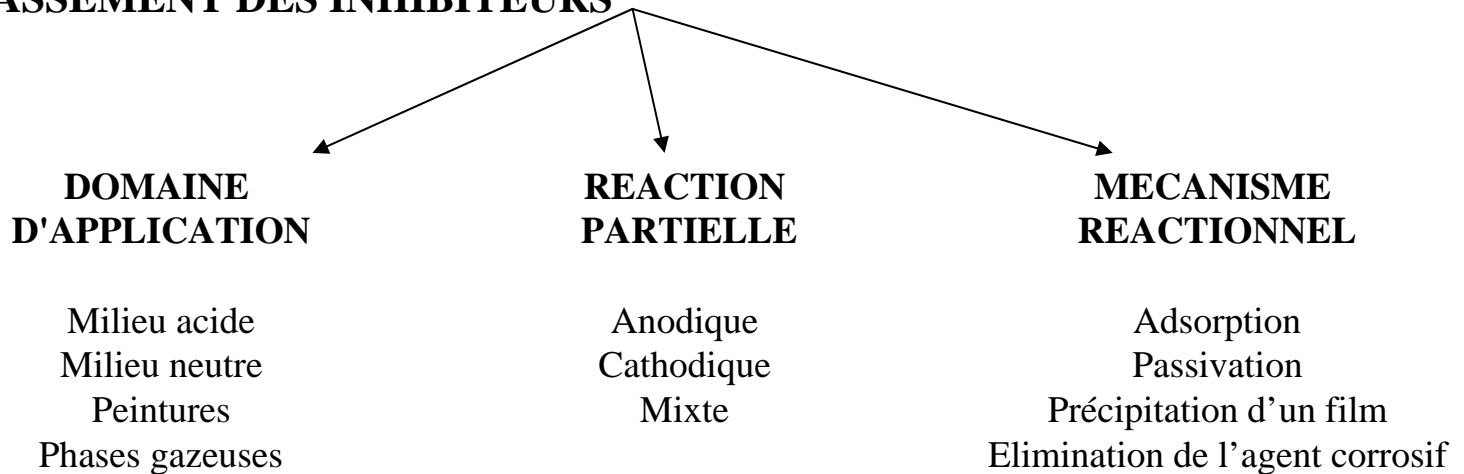
- Excellente résistance à la corrosion dans tous les milieux sauf les bases fortes et l'acide hydrofluorique
- Malgré son prix très élevé, le tantale constitue parfois la seule solution pour les cas extrêmes (industries de H_2SO_4 , des halogènes, pharmaceutiques, ...)

ACTION SUR L'AGENT CORROSIF

PRINCIPE

- Addition d'un composé chimique, appelé inhibiteur de corrosion, en très faible quantité au milieu corrosif pour diminuer la vitesse de corrosion
- Création d'une barrière entre la surface métallique et le milieu corrosif
- Pas de modification de la nature et de la concentration du milieu par l'addition de l'inhibiteur

CLASSEMENT DES INHIBITEURS



ACTION SUR LE PROCESSUS DE CORROSION

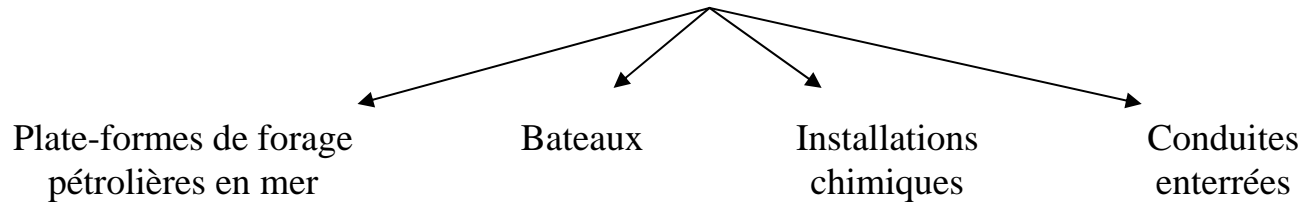
- PROTECTION ELECTROCHIMIQUE -

PROTECTION CATHODIQUE

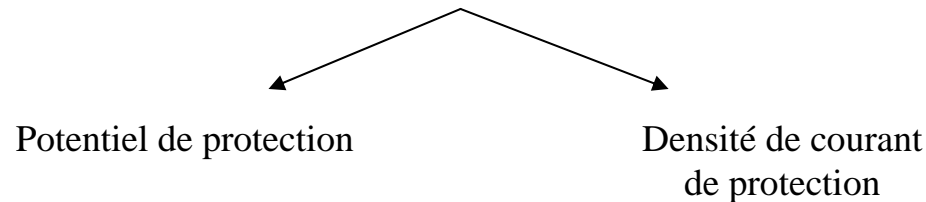
- **PRINCIPE**

- Imposer au métal un potentiel suffisamment bas pour que la vitesse de corrosion devienne négligeable

- **Exemples d'utilisations** : protection des structures lourdes en acier



- Deux paramètres fondamentaux contrôlent la protection cathodique



- **POTENTIEL DE PROTECTION**

- Potentiel d'un métal \leq potentiel de protection $E_{\text{prot}} \Rightarrow$ vitesse de corrosion devient négligeable (raisons thermodynamiques)

- Protection du métal contre la corrosion en lui imposant un potentiel $E \leq E_{\text{prot}}$

- Lois de la thermodynamique $\Rightarrow E_{\text{prot}} = E^\circ + (RT/n F) \ln 10^{-6}$ (mol/l)

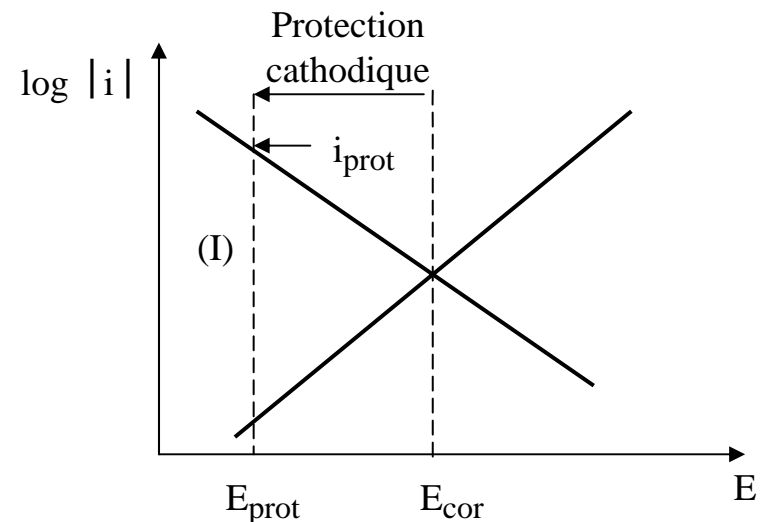
E° = potentiel de référence, R = constante des gaz parfaits, n = nombre d'électrons de valence

- $T = 25 \text{ }^\circ\text{C} \Rightarrow E_{\text{prot}} = E^\circ - (0.354/n)$ (V)

- **Exemples de potentiels de protection** : $E_{\text{prot}} = - 0.62 \text{ V}$ pour l'acier, 0.16 V pour le cuivre, 0.30 V pour le plomb

- **Principe de la protection cathodique** : déplacer le potentiel dans le domaine de protection (I) ($E \leq E_{\text{prot}}$)

- **Densité de courant partiel cathodique** au potentiel de protection : $i_c = i_{\text{prot}}$



- **COURANT DE PROTECTION**

- **Courant de protection I_{prot}** : courant nécessaire pour imposer le potentiel de protection E_{prot}

- I_{prot} dépend de la surface à protéger A et de la densité de courant de protection i_{prot}

$$I_{prot} = i_{prot} \times A$$

- Densité de courant partiel anodique négligeable au potentiel de protection $\Rightarrow i_{prot} = i_c$
 i_c = densité de courant partiel cathodique

- Dans la pratique : utilisation combinée de revêtements organiques et de protection cathodique

Protection cathodique



Evite la corrosion aux endroits défectueux du revêtement (pores, griffures, ...)

Revêtements organiques



La surface métallique A réellement exposée à l'environnement corrosif \ll surface totale



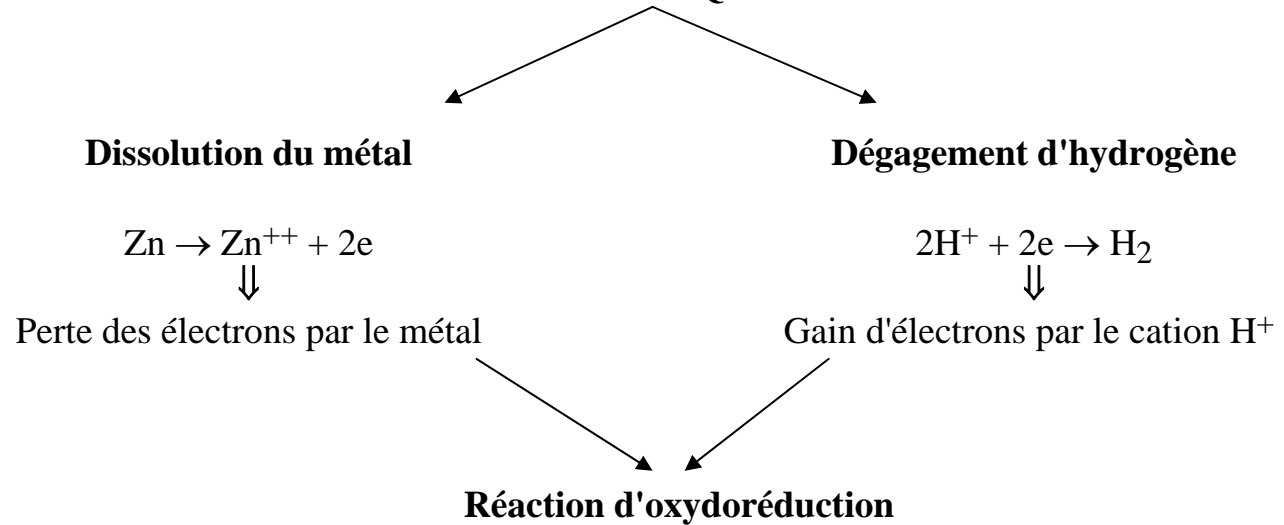
Un courant très faible suffit à protéger une surface géométrique importante

- **Exemple** : courant nécessaire pour la protection cathodique d'une surface de 1 m^2 contre la corrosion provoquée par le sol

Acier non revêtu
 $I_{prot} = 10 - 50 \text{ mA}$

Acier avec revêtement de polyéthylène de 2 mm d'épaisseur
 $I_{prot} = 5 \times 10^{-4} \text{ mA}$

- **REACTION DE CORROSION ELECTROCHIMIQUE**



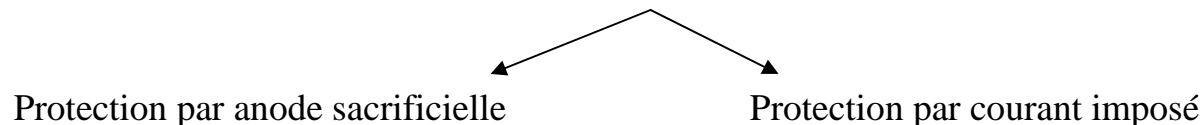
- **PRINCIPE DE PROTECTION**

- Fournir les électrons nécessaires au processus de corrosion à partir d'une source extérieure



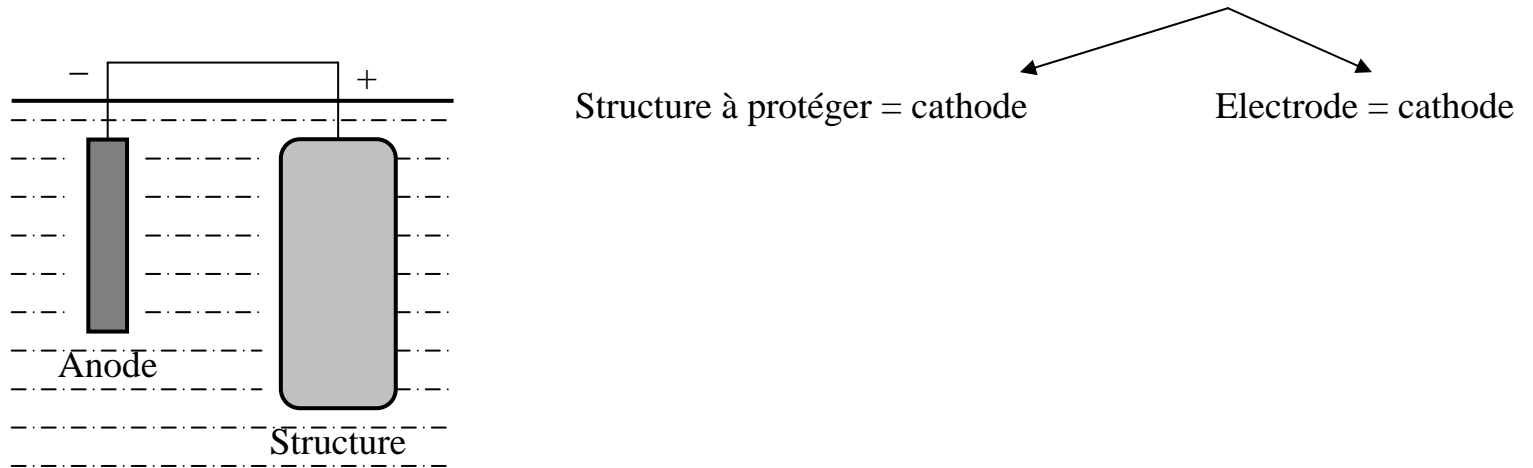
Pas de dissolution du métal

- Deux méthodes de protection cathodique couramment employées



- **PROTECTION PAR ANODE SACRIFICIELLE**

- Liaison du métal à protéger à une électrode plus électronégative \Rightarrow formation d'une pile électrochimique



- **Protection de l'acier** : anodes sacrificielles = Mg, Zn, Al et leurs alliages

- **Comparaison des caractéristiques principales de Mg, Al et Zn**

	Magnésium	Aluminium	Zinc
E° (V)	-1.5	-1.28	-0.76
E_{cor} dans le sol (V)	-1.1 à -1.3	-.06 à -0.9	-0.6 à -.08
Potentiel par rapport à l'acier (V)	-.06	-0.3	-.02
Capacité ohmique (Ah/dm ³)	3840	8050	5840
Rendement (%)	50	80	90
Masse pouvant fournir 0.1 A pendant 10 ans (kg)	8	3.7	12

- **Protection des conduites enterrées** : utilisation de Mg

Différence de potentiel la plus élevée

Meilleure capacité volumique

- **Protection dans l'eau de mer** (électrolyte de bonne conductivité) : la différence de potentiel est moins critique



Utilisation de l'aluminium et du zinc

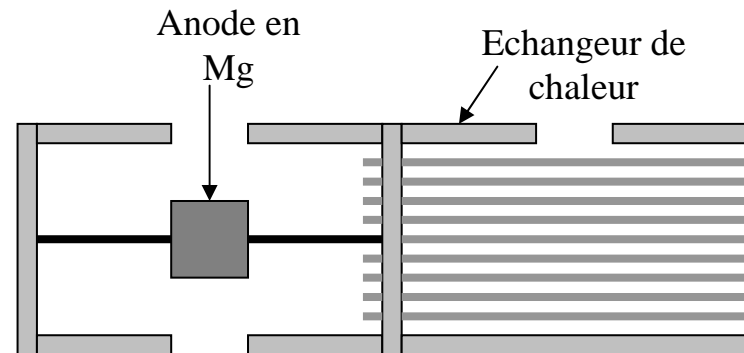


Protection de bateaux, plates-formes de forage, ...

- **Formes des anodes sacrificielles** : tiges, blocs, anneaux

- Anodes soit fixées directement sur l'objet à protéger, soit enterrées à une certaine distance

- **Exemple** : protection d'un échangeur de chaleur



- Variations de la d.d.p. entre le métal et l'électrode à cause de la résistivité électrique du milieu
⇒ utilisation de plusieurs anodes bien réparties autour de la structure à protéger

- **PROTECTION PAR COURANT IMPOSE**

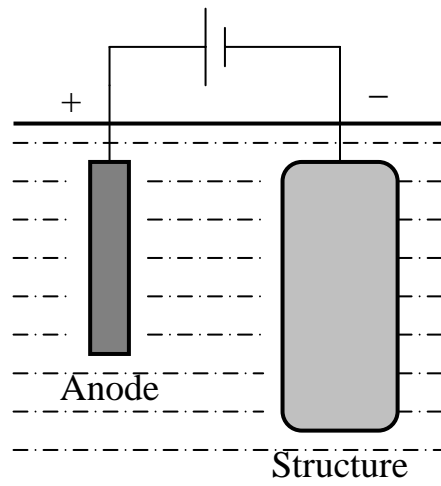
- Electrons fournis par un générateur à courant continu
- Circulation du courant dans une pile constituée par le métal à protéger (cathode) et une anode inerte
- **Anodes inertes :**

Protection des structures enterrées
(conduites de gaz, câbles à haute tension)

↓
anodes en fer – silicium ou en graphite

Préservation des armatures de béton, des réacteurs chimiques ou des bateaux

↓
anodes en titane recouvertes d'oxydes de métaux nobles



- **Avantages** : pouvoir régler la tension ou le courant en fonction des besoins \Rightarrow optimiser le système et protéger de grandes surfaces

- **Précautions** :

Isolation de l'installation
(risques d'incidents)

Entretien et surveillance réguliers
du courant I
(I insuffisant \Rightarrow $V_{\text{corrosion}} \uparrow$)

PROTECTION CONTRE LA CORROSION PAR LES COURANTS VAGABONDS

- **CAUSE :**

Présence de fuites de courant près des centrales électriques, des réseaux de traction électrique ou d'usine à forte puissance électrique



Corrosion des structures enterrées : canalisations, câbles, ... se trouvant au voisinage de ces installations

- **METHODES DE PROTECTION**

Protection passive

Déversoir de courant

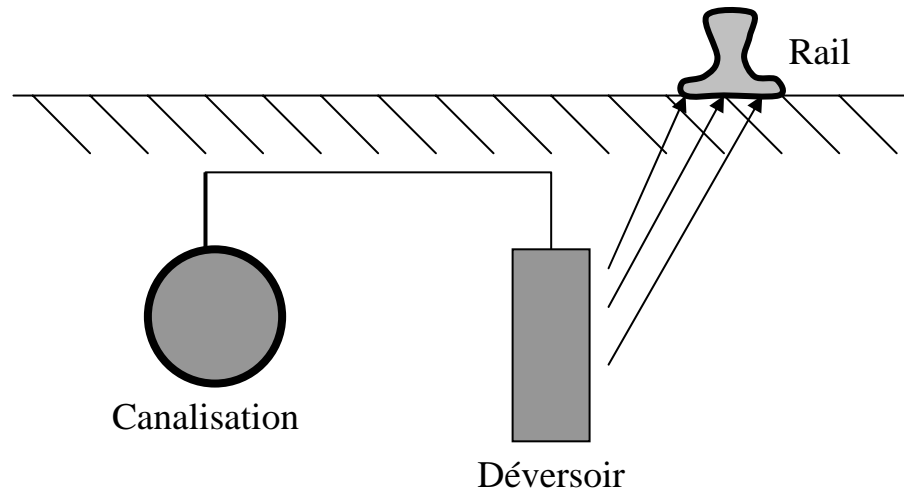
- **PROTECTION PASSIVE**

Isolation de l'installation avec un revêtement non conducteur : houille, bitume, ...

- **DEVERSOIRS DE COURANT**

- Liaison de la structure à une pièce bonne conductrice de courant \Rightarrow déversement des courants vagabonds dans cette pièce $\Rightarrow V_{\text{corrosion}} \downarrow$

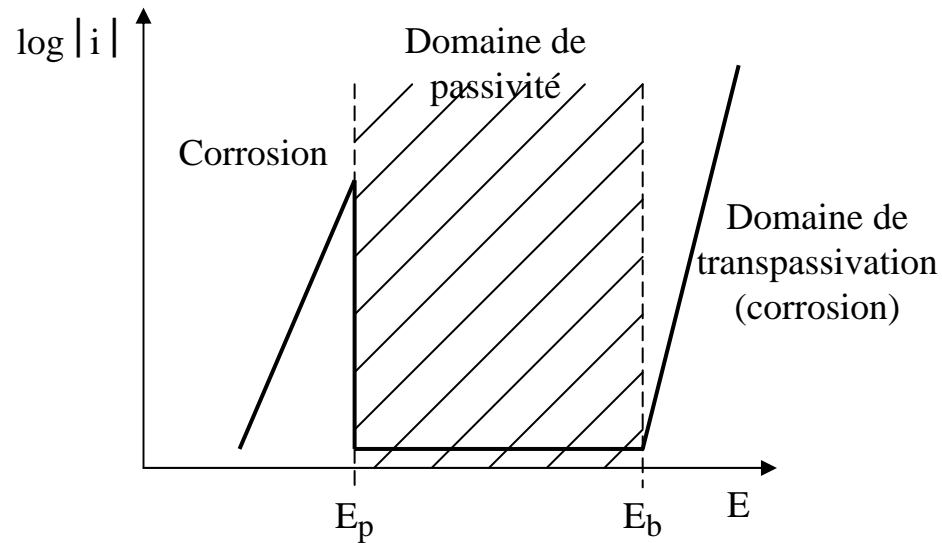
- Protection par déversoir contre la corrosion par des courants vagabonds provenant d'un réseau de traction électrique :



PROTECTION ELECTROCHIMIQUE PAR PASSIVATION

- **PRINCIPE**

- Méthode de protection applicable aux métaux passivables
- Imposer au métal un potentiel correspondant au domaine de passivité

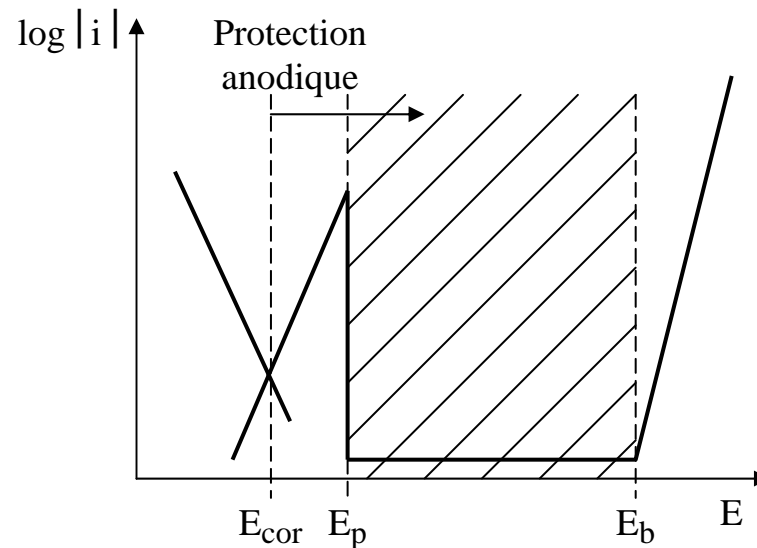


- Domaine de passivité stable : $E_p < E < E_b \Rightarrow$ vitesse de corrosion négligeable
- E_p potentiel de passivation
- E_b potentiel de transpassivation

- **PROTECTION ANODIQUE**

- Elle s'applique aux métaux passivables, dont le potentiel de corrosion se situe dans le domaine actif $E_{cor} < E_p$

- Polarisation anodique : déplace le potentiel dans le domaine passif

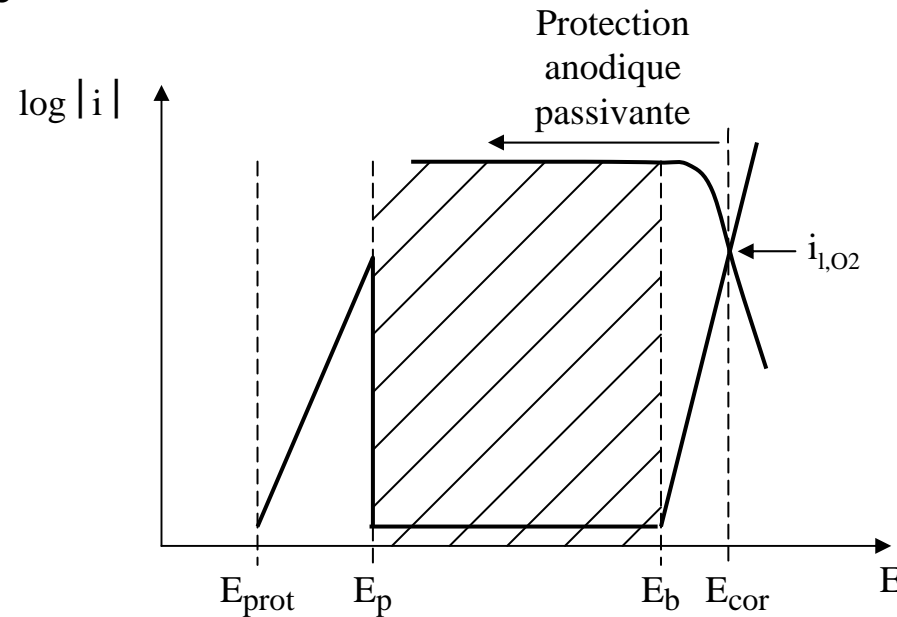


- Maintien du métal à l'état passif (protection anodique) : nécessite une densité de courant passif très faible

- Atteinte de l'état passif : appliquer initialement une densité de courant nettement plus élevée que celle pour le maintien à l'état passif

- **PROTECTION CATHODIQUE PASSIVANTE**

- S'applique aux métaux passivables dont le potentiel de corrosion se situe dans le domaine transpassif
- Protection cathodique passivante : déplacer le potentiel du métal vers le domaine de passivité stable




- Maintien à l'état passif : appliquer une densité de courant cathodique suffisante

RESISTANCE A LA CORROSION DES MATERIAUX NON METALLIQUES

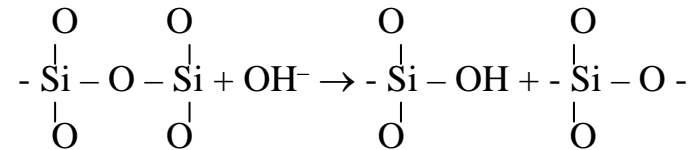
• POLYMERES

- Résistance d'un polymère à la corrosion et aux agents chimiques : fonction de sa structure moléculaire
- Il existe des polymères ayant une excellente résistance à la corrosion (exemple : polyoléfines, polyfluorés)
- ⇒ utilisation dans le stockage de liquides très corrosifs : acides, bases, solvants organiques
- Mécanismes de corrosion des polymères très complexes (non électrochimiques)

Type de polymère	Formule chimique	Résistance à la corrosion
polyéthylène (PE) polypropylène (PP)	$(\text{CH}_2 - \text{CH}_2)_n$ $(\text{CH}_2 - \underset{\text{CH}_3}{\text{CH}})_n$	- Très bonne stabilité chimique - Non attaqués par les acides (sauf oxydants), les bases et les solutions de sels. - Insolubles dans l'eau.
Polychlorure de Vinyle (PVC)	$(\text{CH}_2 - \underset{\text{Cl}}{\text{CH}})_n$	- Résiste bien aux acides, bases, huiles, alcools, hydrocarbures aliphatiques. - Sensible aux hydrocarbures aromatiques et chlorés, aux esters et cétones.
Polystyrène (PS)	$(\text{CH}_2 - \underset{\text{C}_6\text{H}_5}{\text{CH}})_n$ 	- Résiste bien aux acides dilués, aux solutions salines aqueuses et aux bases. - Attaqué par les acides très oxydants (HNO ₃) - Se dissout et gonfle dans de nombreux milieux organiques
Polyméthacrylate de méthyle (PMMA) (ex: plexiglas)	$(\text{CH}_2 - \underset{\text{CH}_3}{\overset{\text{CO}_2\text{CH}_3}{\text{C}}})_n$	- Jusqu'à 60°C, le PMMA résiste assez bien aux acides organiques et minéraux dilués ainsi qu'aux solutions alcalines diluées. - Attaqué par des produits courants: acétone, alcool, benzène, pétrole,...
Polytétrafluoroéthylène (PTFE) (ex: téflon)	$(\text{CF}_2 - \text{CF}_2)_n$	- Stabilité chimique remarquable: résiste bien à l'acide fluorhydrique, nitrique concentré, soude chaude, chlore gazeux, ... - Utilisé pour revêtements anti-adhérents.
Polyamides (PA) (ex: nylons)	ex: PA 6-6 $(\text{NH}-(\text{CH}_2)_6-\text{NH}-\text{CO}(\text{CH}_2)_4-\text{CO})_n$	- Bonne inertie chimique vis-à-vis des huiles, graisses, hydrocarbures, cétones, ... - Résistance moyenne aux agents atmosphériques (surtout la lumière solaire).

- **CERAMIQUES**

- En général **très résistants à la corrosion**
- Il existe des exceptions où des problèmes de corrosion peuvent apparaître
- **Corrosion des verres minéraux par l'hydroxyde de soude** : hydrolyse du réseau silicique de surface



Ternissement de la surface du verre

- **Dégradations des matériaux de construction** : béton, ciment, pierre calcaire, brique



Dissolution du carbonate de calcium et de certains sels calcaires par les ions HCO_3^- , SO_3^{--} et SO_4^{--} contenus dans certaines eaux de pluie

- **Autre type de dégradation des matériaux de construction** : destruction superficielle et profonde sous l'action des cycles de gel - dégel



L'eau qui pénètre dans les réseaux capillaires se congèle, à des températures plus ou moins basses, et entraîne un éclatement du matériau

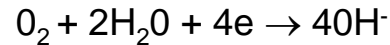
ETUDE DE CAS DE DEGRADATIONS PAR CORROSION

PROTECTION DES PIPES-LINES SOUTERRAINS

- CAUSES DE LA CORROSION

- Pipes-lines : transport à longue distance du pétrole ou du gaz naturel
- Pipes-lines en acier ordinaire
- Sol humide + présence d'oxygène \Rightarrow corrosion des pipes-lines

Réduction de l'oxygène



Corrosion du métal



Conséquences catastrophiques



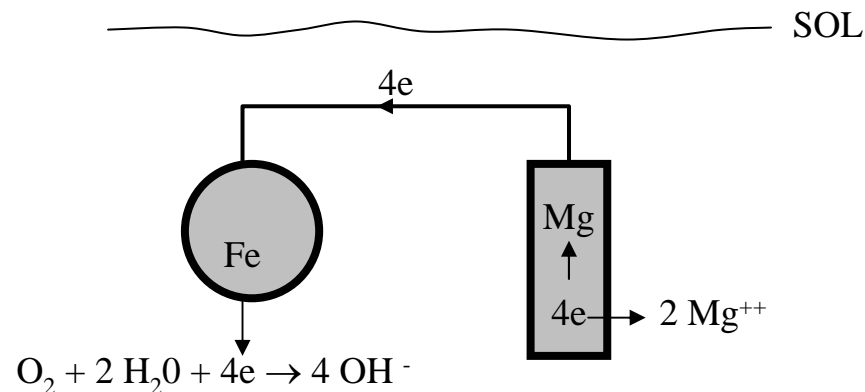
Protection nécessaire

- **PREMIERE PROTECTION**

- Recouvrement des pipes-lines avec des feuilles épaisses de polyéthylène maintenues en place par une colle butylique
- Les éléments de canalisations sont soudés entre eux. Les soudures sont enveloppées sur place avec du polyéthylène
- Protection non complète : ruptures du revêtement à cause des manipulations brutales sur les chantiers, emballage imparfait des soudures

- **PROTECTION PAR ANODES SACRIFICIELLES**

- Raccordement des pipes-lines à des plaques de métal plus électronégatif que l'acier
↓
- Pipes-lines = cathodes \Rightarrow non attaqués
- Plaques de métal = anodes \Rightarrow corrodées à la place des pipes-lines

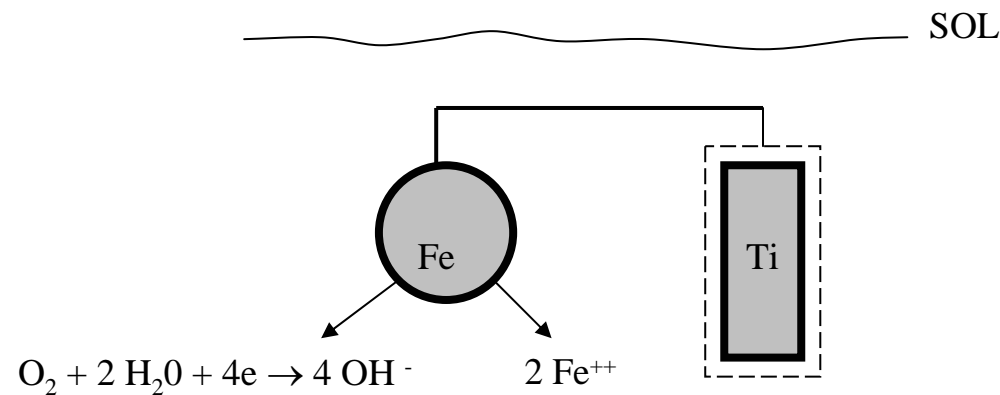


- **Anodes sacrificielles** : en général en alliages de magnésium (Mg + 6% Al + 3% Zn + 0.2% Mn), d'aluminium (Al + 5% Zn) ou de zinc

- Les éléments d'alliages ont pour but d'éviter la formation à la surface d'une couche protectrice d'oxyde
⇒ difficulté pour le métal de traverser cette couche et passer en solution ⇒ protection inefficace

- **Exemple** : anodes sacrificielles en titane

Ti plus électro-négatif que l'acier mais ne protège en rien le pipe-line à cause de la formation d'une couche d'oxyde de titane en surface



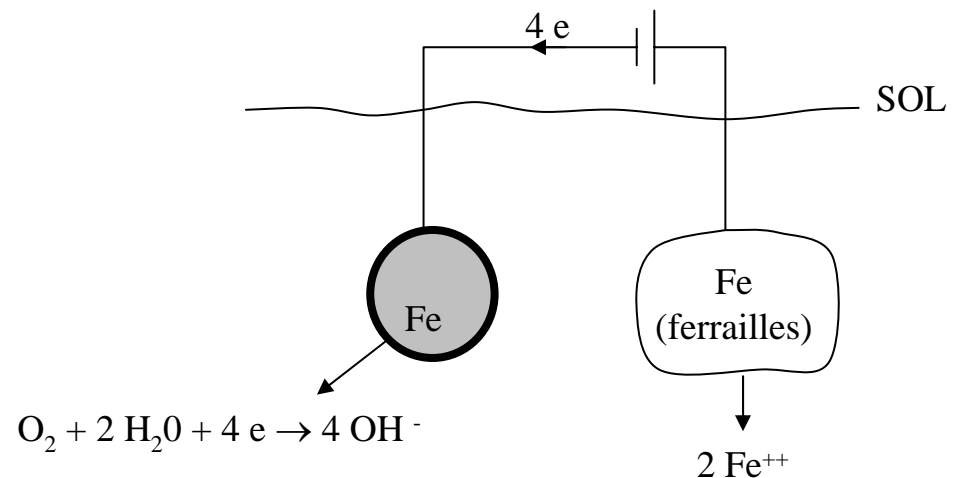
- Dissolution des anodes ⇒ contrôle périodique ⇒ remplacement éventuel

- Le revêtement en polyéthylène minimise la perte de métal aux anodes ⇒ utilisation conjointe du revêtement et de la protection par anodes sacrificielles

- **PROTECTION PAR COURANT IMPOSE**

- Raccordement de la ferraille enterrée au pipe-line à travers un générateur de courant continu qui maintient une d.d.p. suffisante pour être sûr que la ferraille joue le rôle d'anode et le pipe-line le rôle de cathode (d.d.p. \cong 1 volt)

- Présence de revêtement protecteur en polyéthylène \Rightarrow faible intensité du courant pour maintenir la d.d.p. (absence de revêtement \Rightarrow intensité du courant \uparrow)



- **SUBSTITUTION DE MATERIAU**

- Pipes-lines utilisés sur de longues distances \Rightarrow l'utilisation d'un autre matériau métallique coûterait plus cher (exemple : acier inoxydable)

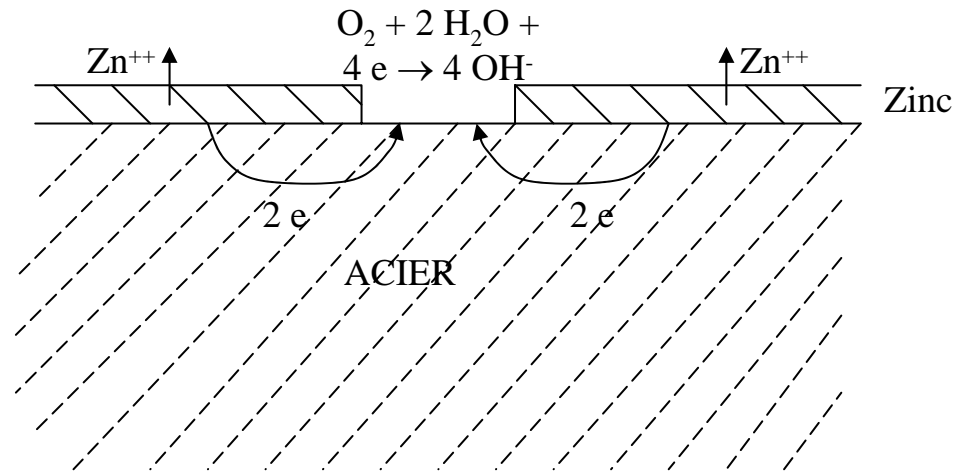
- Matériau concurrent : polymère \Rightarrow pas de corrosion par le sol

- Pour les pipes-lines de gros diamètre : la résistance mécanique des polymères est insuffisante

MATERIAUX POUR TOITURE DE BATIMENT INDUSTRIEL

- **PREMIERE SOLUTION**

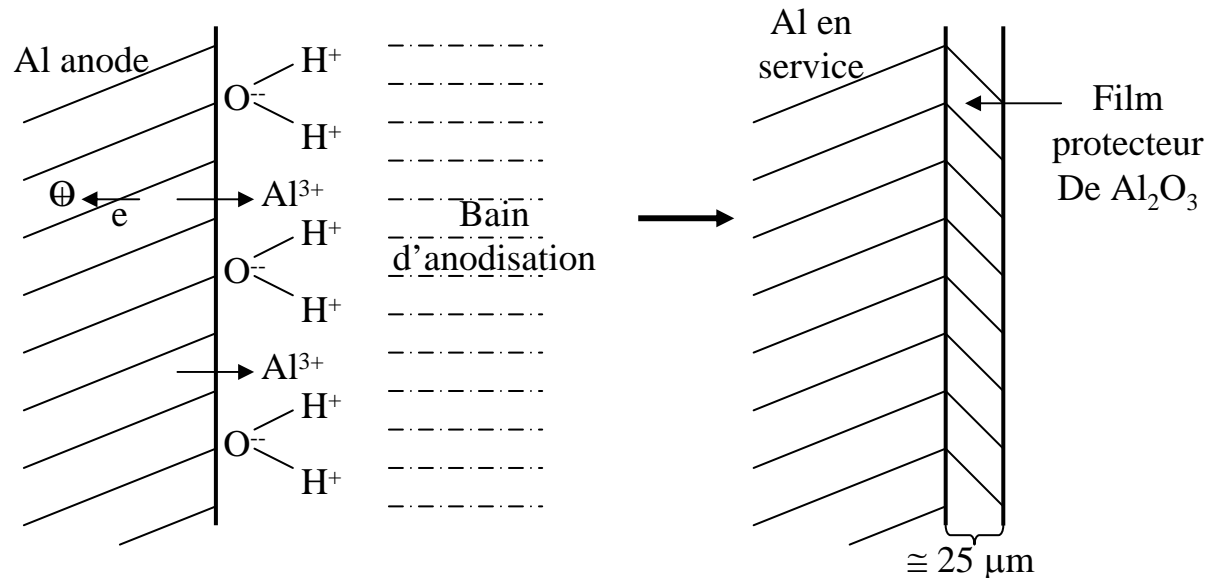
- Tôles en acier galvanisé : légères, bon marché, faciles à installer
- Bonne résistance à la corrosion : revêtement de Zn = anode \Rightarrow corrodé ;
acier = cathode \Rightarrow protégé contre la corrosion



- Corrosion lente du zinc à cause de l'effet protecteur de sa couche d'oxyde : $\cong 0.1$ mm de perte d'épaisseur en 20 ans
- Epaisseur du revêtement obtenue par immersion dans le zinc liquide : en général $\cong 0.15$ mm
- **Problème** : après $\cong 30$ ans, disparition du revêtement de zinc \Rightarrow **apparition de la rouille**
- Peut-on augmenter l'épaisseur du revêtement de zinc ?
- **Solution** : dépôt électrolytique du zinc \Rightarrow épaisseur du revêtement \uparrow mais le coût de la tôle galvanisée \uparrow

- **1^{ER} MATERIAU DE SUBSTITUTION**

- **Aluminium anodisé** : plus cher que l'acier galvanisé mais résiste beaucoup plus longtemps à la corrosion
- Résistance à la corrosion atmosphérique de l'aluminium grâce à la formation d'un film très adhérent d'alumine Al_2O_3
- **Anodisation** : épaisseur de la couche d'alumine artificiellement pour augmenter son efficacité protectrice
- **Procédé d'anodisation** : placer l'aluminium au pôle + d'une cellule d'électrolyse \Rightarrow oxydation de l'aluminium \Rightarrow épaisseur de la couche d'alumine



- **2^{EME} MATERIAU DE SUBSTITUTION**

- **Matériaux polymères** : résistance remarquable à la corrosion atmosphérique
- **Feuilles de plastique ondulé** : utilisées communément pour la couverture de petits baraquements, abris pour voitures ou bâtiments similaires
- **Dégradations des polymères** : vieillissement à long terme causé par les rayons ultra-violet du soleil
 ⇒ rupture progressive des chaînes macromoléculaires ⇒ dégradation des propriétés mécaniques des polymères

- **FIXATION DES TOITURES**

- **Erreur courante** : fixation des toitures en acier galvanisé ou en aluminium anodisé à l'aide de clous ou de vis en métal différent : cuivre ou laiton

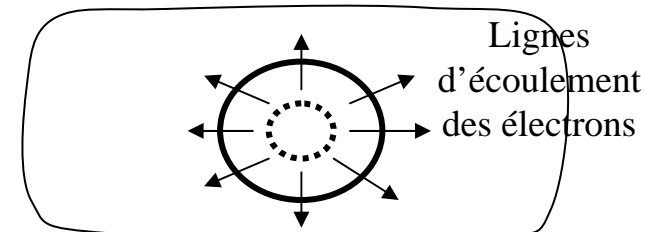
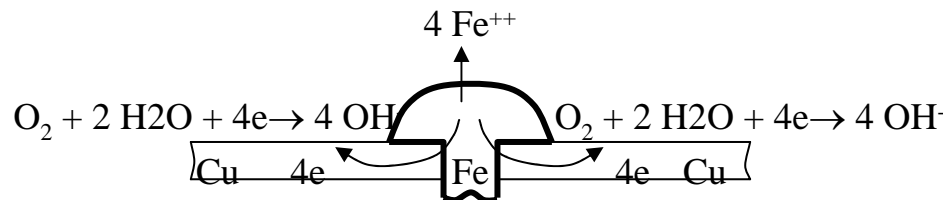


Création d'une pile électrochimique : Zn ou Al = anode (corrodé), Cu = cathode



Corrosion de la tôle au voisinage des fixations

- **Exemple d'erreur de fixation** : plaques de cuivre fixées à l'aide de clous en acier ⇒ corrosion rapide et catastrophique des clous car les plaques sont bonnes conductrices et ont une grande surface



POTS D'ECHAPPEMENT D'AUTOMOBILES

- **MATERIAU COURAMMENT UTILISE**

Acier doux malgré sa faible résistance à la corrosion



Rouille causée par la vapeur d'eau contenue dans les gaz d'échappement du moteur

- **PREMIERE SOLUTION**

- Galvaniser l'acier

- **Problème** : risque d'évaporation du zinc au voisinage de la soudure ⇒ l'effet protecteur du zinc peut disparaître

- **MATERIAU DE SUBSTITUTION**

- Acier inoxydable

- **Inconvénient** : corrosion intergranulaire aux joints soudés (appauvrissement en Cr par formation de carbures)

- **Solution** : utiliser un acier inoxydable stabilisé au Ti ou au Nb

