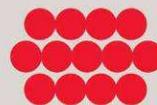




Durabilité des Armatures en Acier

Recherches initiales et formalisation



Plan

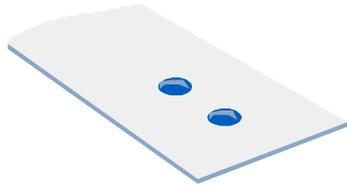
- Introduction
- Mécanisme de corrosion
- Acier galvanisé
- Cinétique de dégradation
- Recherche
- Formalisation



Introduction

- HA/HAR : technologies successives

ARMATURES LISSES



De 1967 à 1976

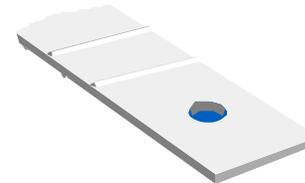
Acier galvanisé
Epaisseur 3 mm
+ 25-40 μm zinc

De 1972 à 1975

Métaux passivables
- Acier inoxydable (65 structures)
- Alliage Al-Mg (8 str.)

Ces matériaux passivables se sont montrés inadéquats, conduisant à des cinétiques de corrosion excessives

ARMATURES NERVUREES (Haute Adhérence HA)

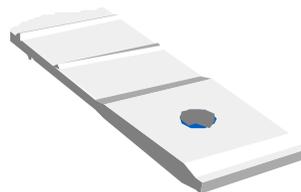


Depuis 1976

Galvanisation à chaud
Epaisseur 4 ou 5 mm
+ $\geq 70 \mu\text{m}$ zinc

Adhérence sol/armature améliorée

ARMATURES H.A. A EXTREMITE RENFORCEE (HAR)

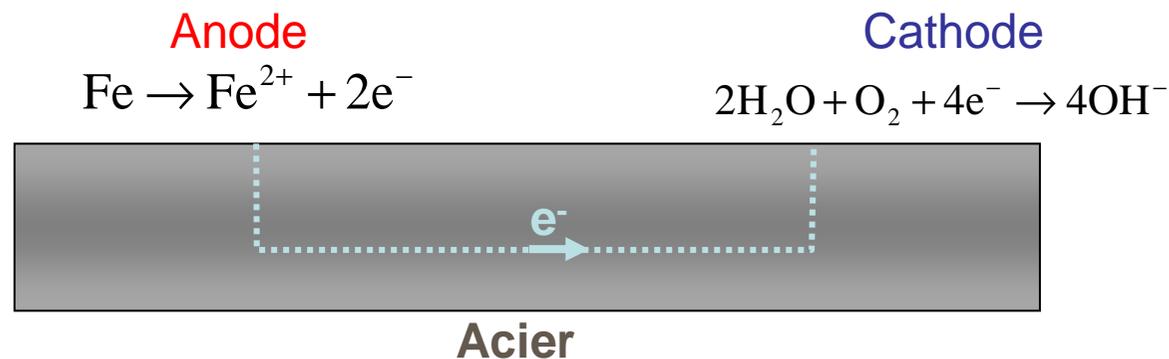


Depuis 1986

Galvanisation à chaud
Epaisseur 5 mm
+ Extrémité épaissie au laminage

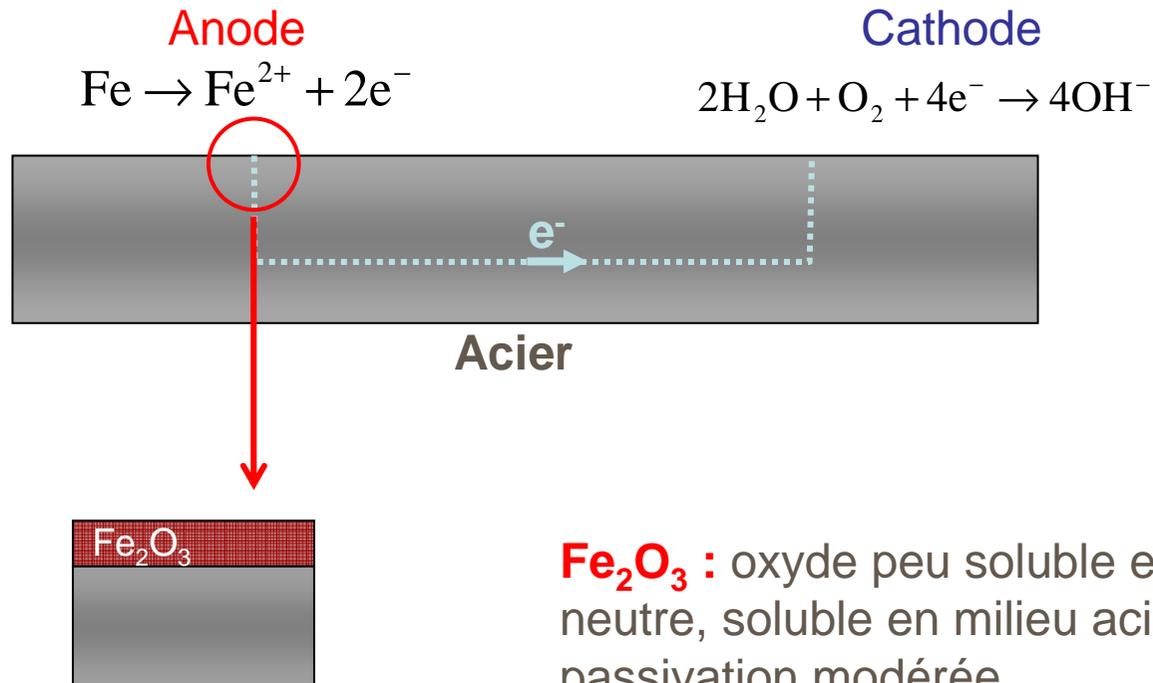
Mécanisme de corrosion

- Corrosion: oxydation naturelle des métaux par réaction d'oxydo-réduction
 - Dégradation surfacique
 - Perte progressive des caractéristiques mécaniques
- Oxydation aqueuse en environnement neutre (pH = 7)



Mécanisme de corrosion

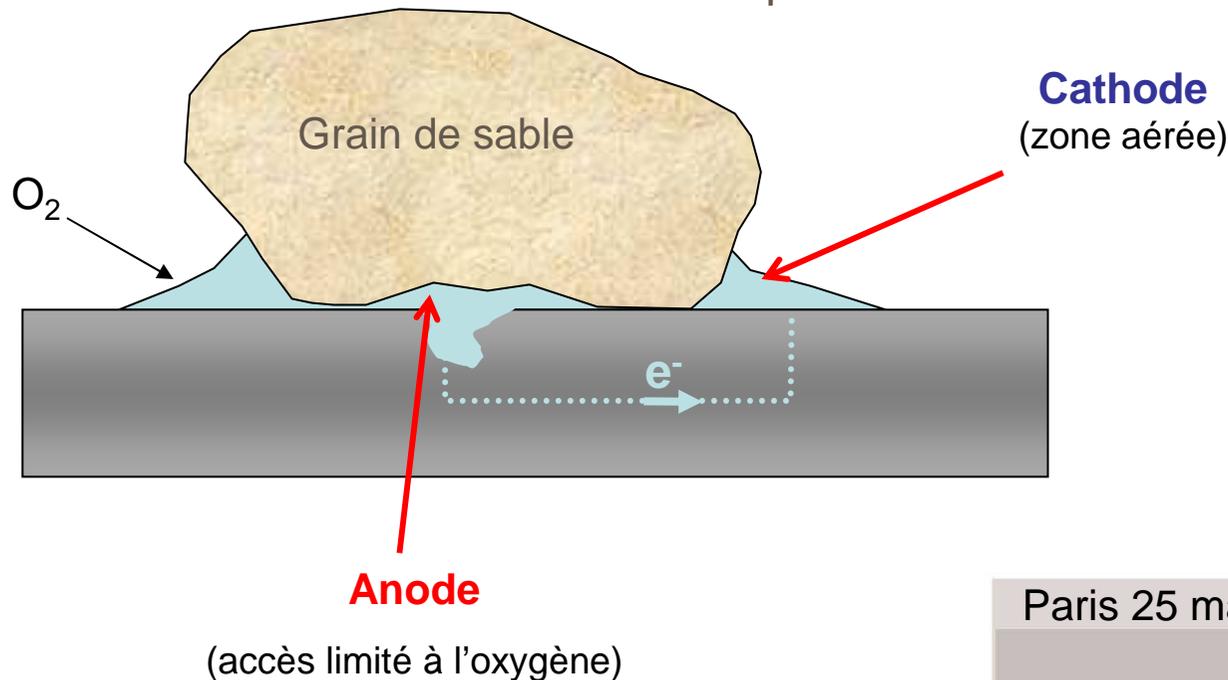
- Corrosion (pH = 7): initiée par des irrégularités de surface



Dans le sol

- Aération différentielle – micro pile
 - Gradient de concentration en oxygène dans l'eau adsorbée

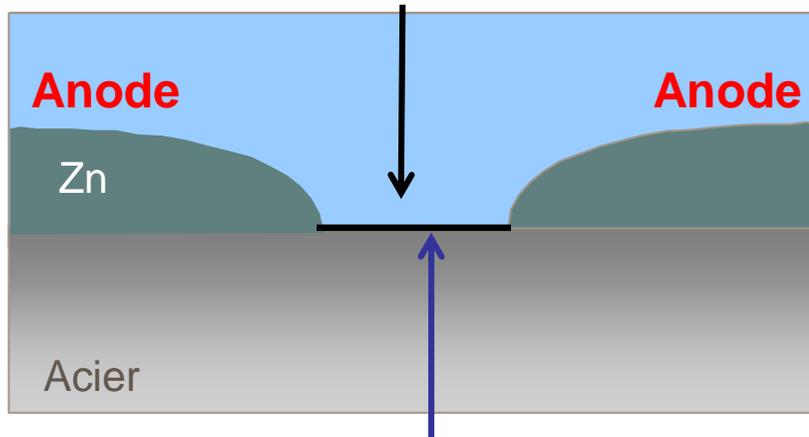
Faible concentration en oxygène dissous : affaiblissement de la couche passive et consommation d'acier



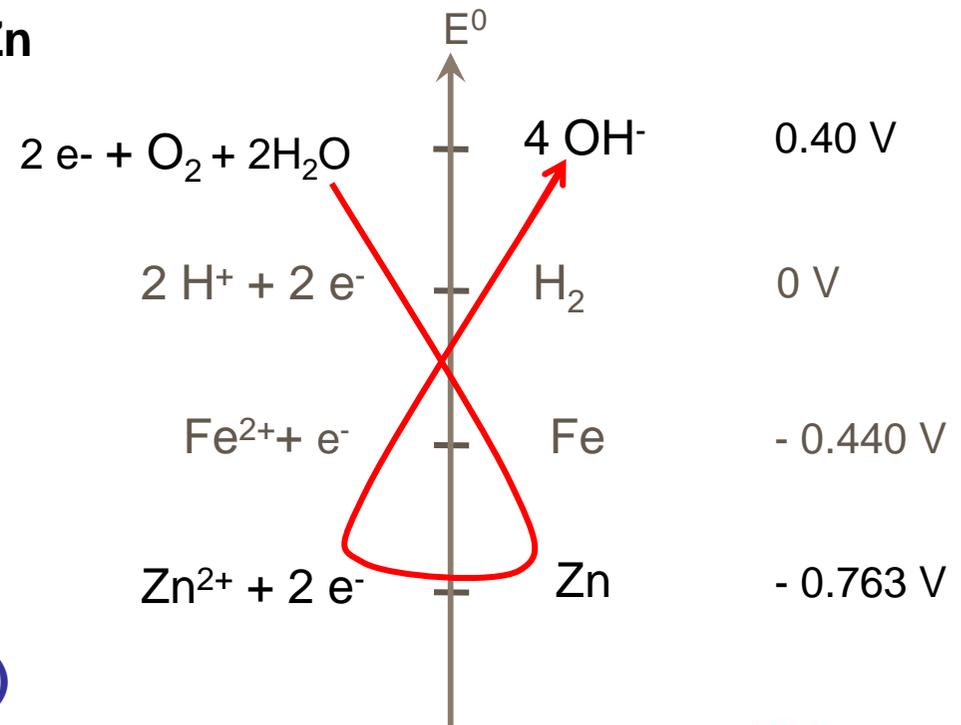
Acier galvanisé

- Une barrière physico-chimique contre la corrosion de l'acier : anode sacrificielle

Dépôt des produits de corrosion du Zn
 Zn(OH)_2 très peu soluble en milieux modérément acides ou basiques



Zone cathodique (pas de corrosion)

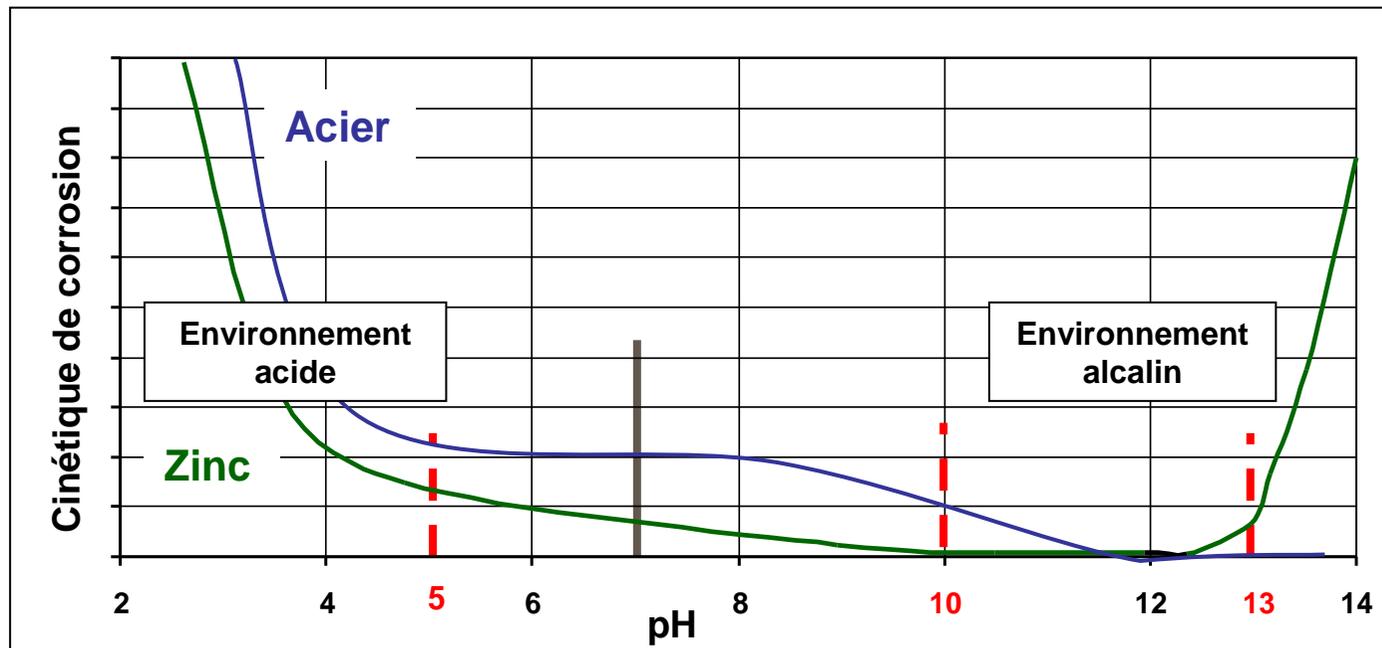


Cinétique de dégradation

- Dépend des caractéristiques chimiques et physico-chimiques des sols
 - **pH**: en milieux très acides ou très basiques la corrosion est accélérée par dissolution de la couche passive $Zn(OH)_2$
 - **Teneur en sels solubles**: en particulier les sulfates et les chlorures naturellement ou artificiellement présents, dans certains cas aussi les ions sulfures. Ces ions créent des complexes qui peuvent affaiblir la couche passive. Ils sont aussi bons porteurs de courant et réduisent la résistivité des remblais.
 - **Matière organique**: peut induire des mécanismes de bio-corrosion (rare)

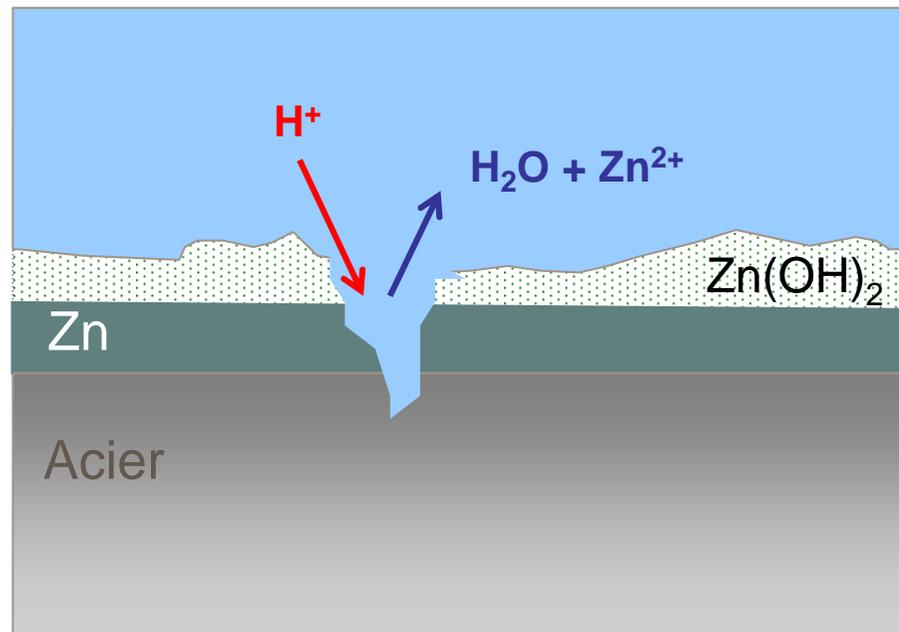
Cinétique de corrosion

- Effet du pH sur la stabilité de l'acier et du zinc



Cinétique de corrosion

- Corrosion en environnement acide ($\text{pH} < 5$)

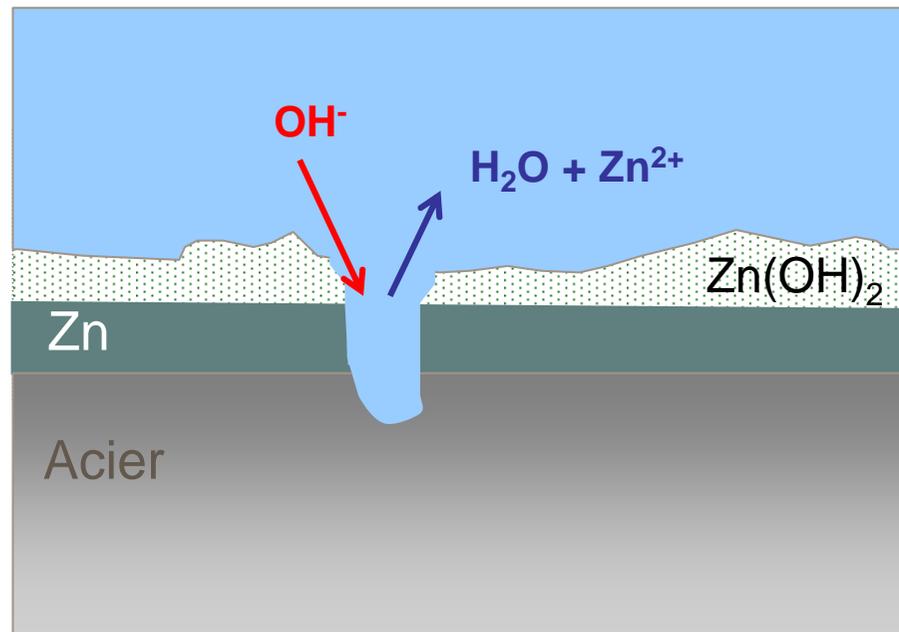


Augmentation de la cinétique :

- les protons H^+ dissolvent la couche passive et dégradent la protection cathodique (Zn)
- puis attaquent l'acier
- dégradation locale de l'acier

Cinétique de corrosion

- Corrosion en environnements alcalins



1. Si localement $\text{pH} > 12$:

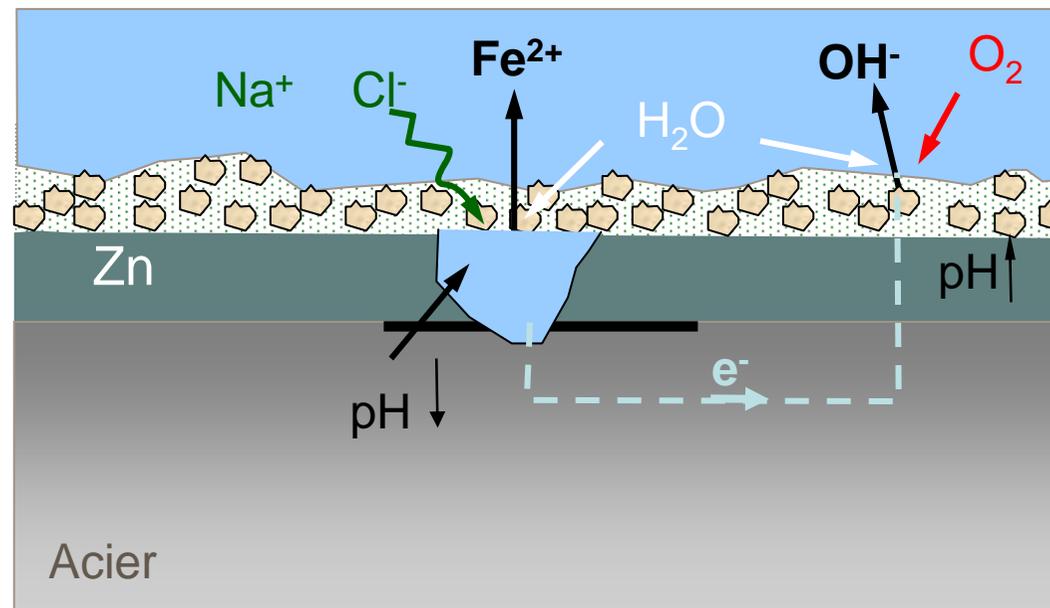
- Les ions OH^- dissolvent la couche passive et dégradent la protection cathodique (Zn)

2. Puis, si localement $\text{pH} < 12$:

- La corrosion de l'acier s'initie

Cinétique de corrosion

- Teneur en sels : sulfates et chlorures
 - Ils ne participent pas directement à la réaction, mais affaiblissent la couche passive



= gangue : matrice de particules de sol et $Zn(OH)_2$

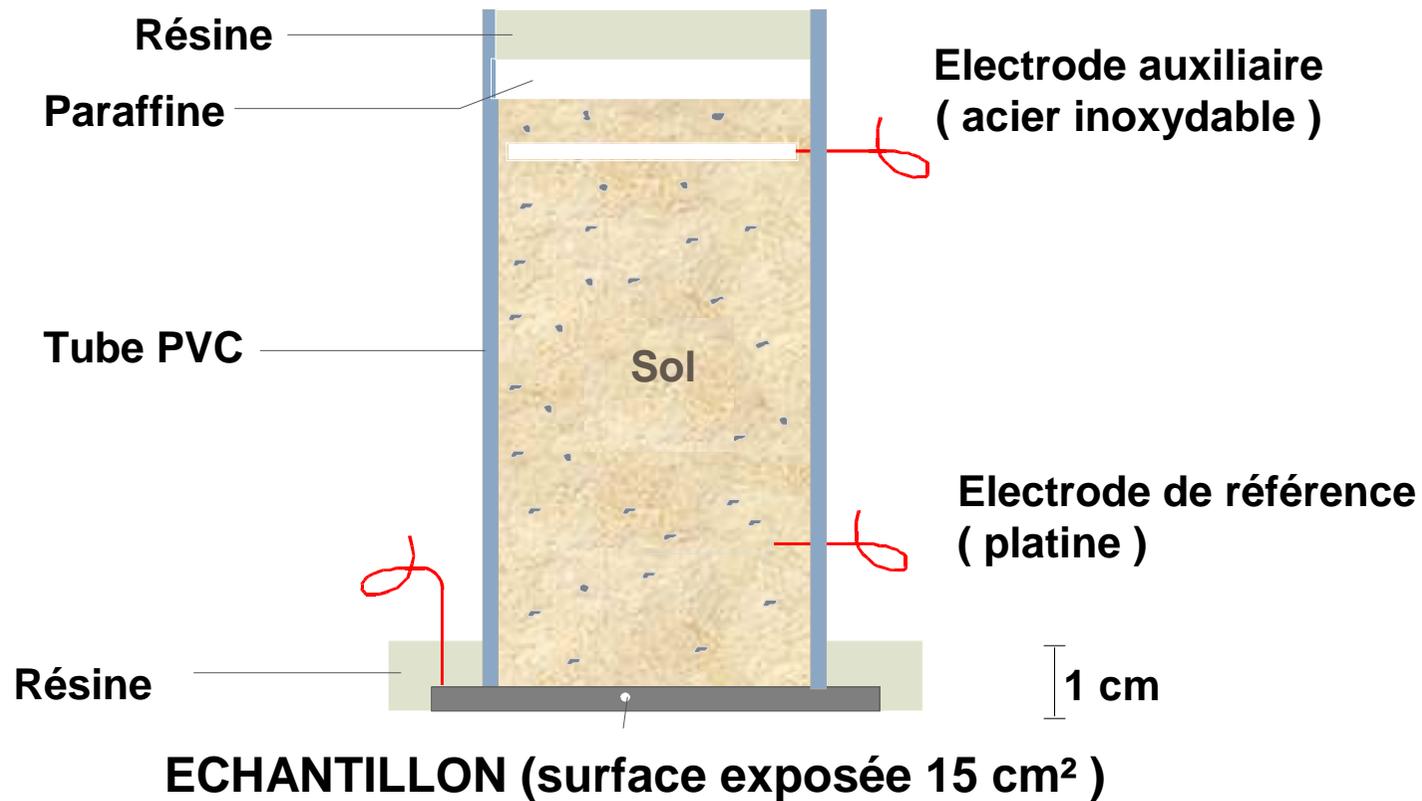
Recherches TAI

- Programme ambitieux
 - Influence quantitative des principaux paramètres
 - Examen des résultats de Romanoff
 - Mise au point d'une technique de mesure des taux de corrosion en laboratoire
 - » **Cellules de corrosion**
 - Validation par essais à long terme
 - » **Essais en cuves fermées**
 - Mesure des pertes de masse
 - Mesure des pertes de résistance



Recherches TAI

- Cellules de corrosion

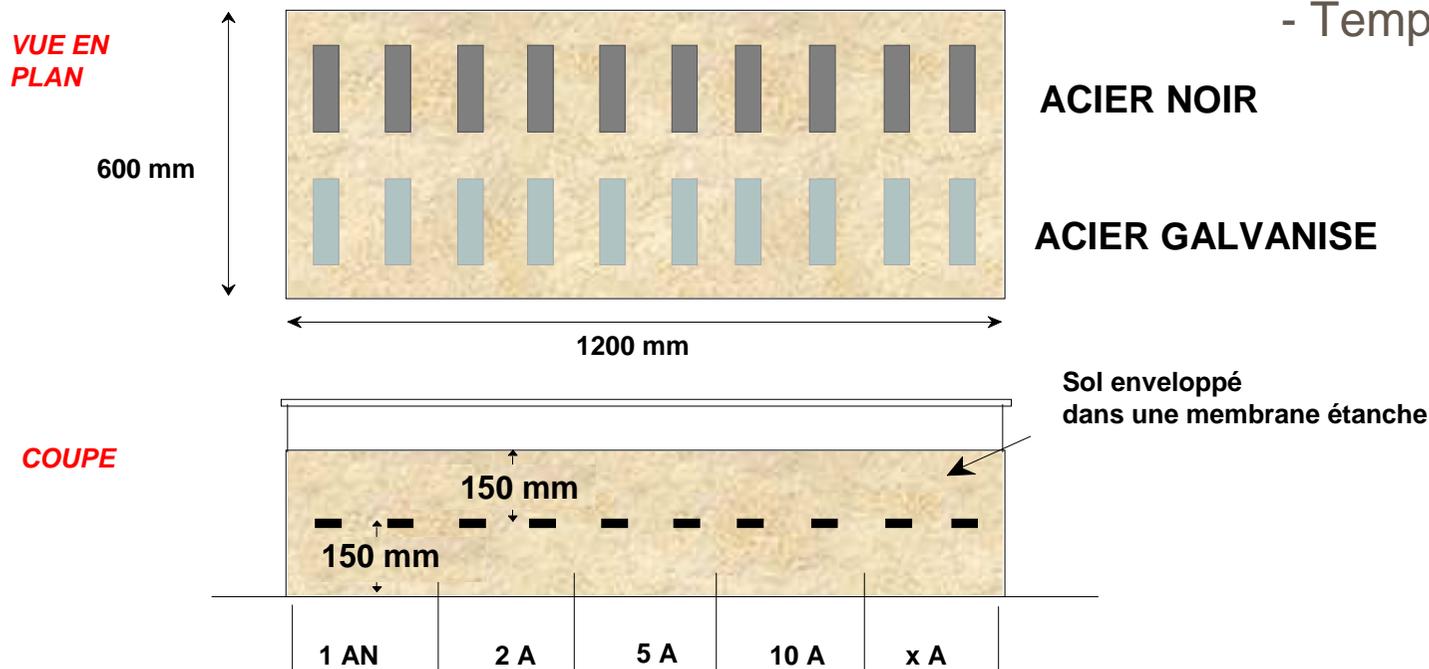


Recherches TAI

● Essais en cuves fermées

Paramètres étudiés:

- pH (sol traité)
- teneur en sels
- Type de protection
- Temps (jusqu'à 19 ans)



Formalisation

- Perte de masse : enveloppe en fonction du temps

$$P = A.T^n$$

P: perte d'épaisseur moyenne d'acier par face (zinc et acier)

A: coefficient dépendant de l'agressivité du sol et de la condition de l'ouvrage

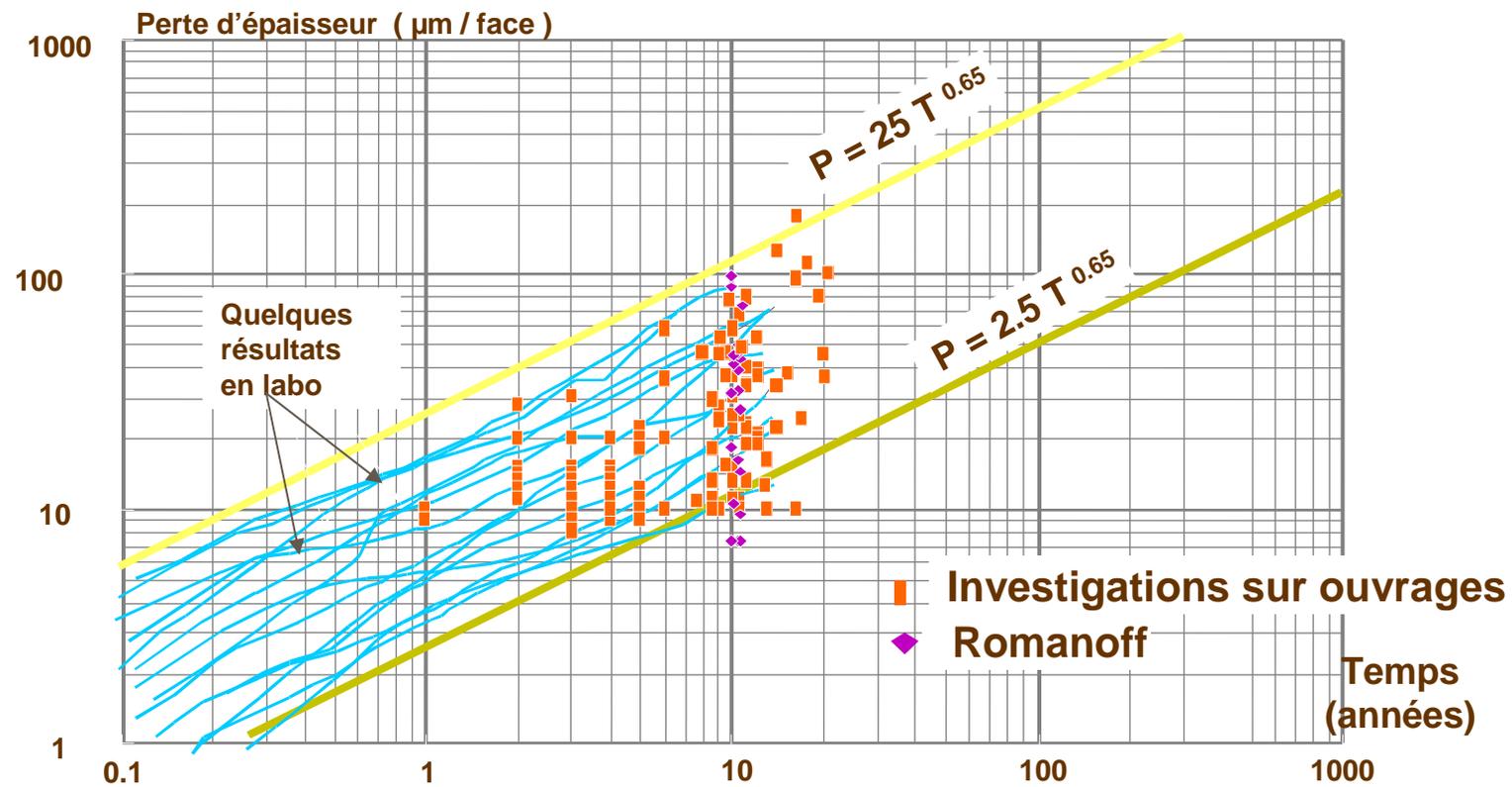
- **A** = 25 μm pour les sols granulaires hors d'eau, acier galvanisé
- **A** = 40 μm pour les sols granulaires et les ouvrages couramment submergés (eau douce), acier galvanisé
- **A** représente la perte d'épaisseur maximale par face au bout de la première année de fonction

T: temps (années)

n: exposant (généralement 0,65 les structures hors d'eau).



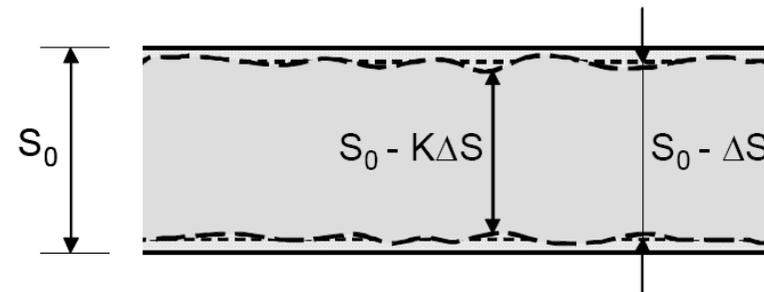
Formalisation



Formalisation

- Perte de résistance

$$\Delta R/R_0 = K \cdot \Delta W/W_0$$



K: coefficient d'hétérogénéité, dépendant du type de revêtement

$\Delta R/R_0$: perte relative de résistance

$\Delta W/W_0$: perte relative de masse d'acier

La même expression, en remplaçant $\Delta W/W_0$ par $\Delta S/S_0$, est vraie

Formalisation

- Perte relative de masse d'acier :

$$\Delta W/W_0 = \Delta e/e_0 = 2 * (P - e_{Zn})$$

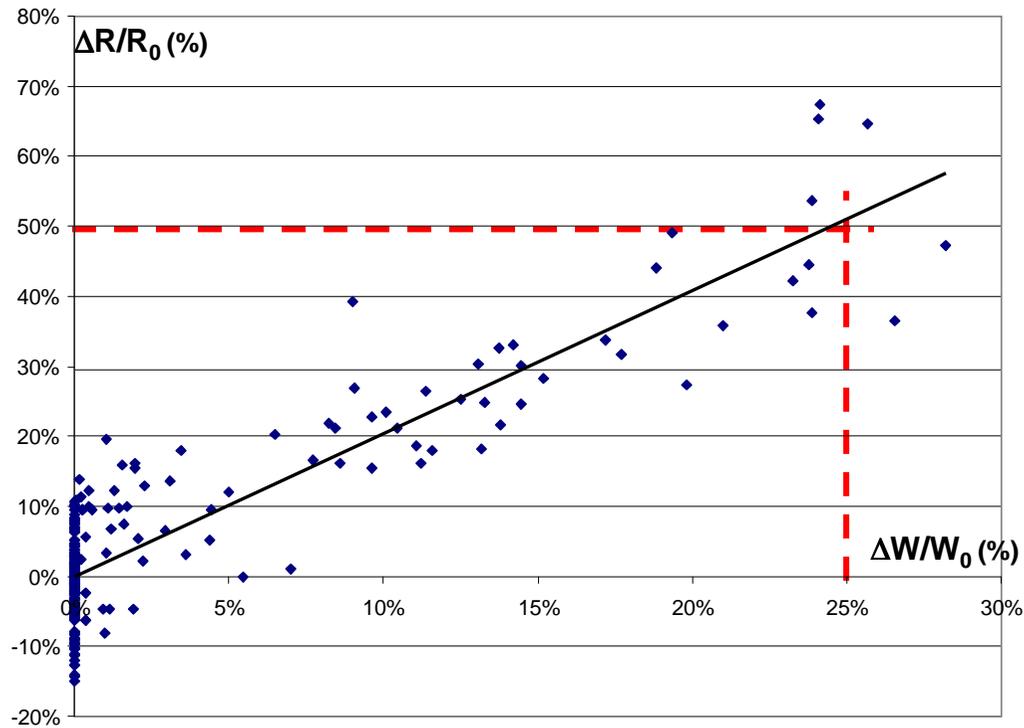
e_0 : épaisseur initiale

e_{Zn} : épaisseur initiale de zinc



Formalisation

- Représentation graphique



- Etude expérimentale : $K \leq 2$
 - Hétérogénéité de la corrosion
- 50% de perte de résistance correspond à 25% de perte de masse (ou de section)

Limites d'agressivité des remblais pour les ouvrages "permanents"

	Unité	Hors d'eau	Immergé
Résistivité (à l'état saturé)	$\Omega.cm$	> 1000	> 3000
pH	—	5 < pH < 10	5 < pH < 10
Chlorures	mg/Kg	< 200	< 100
Sulfates ⁽³⁾	mg/Kg	< 1000	< 500
5 [Cl ⁻] + [SO ₄ ²⁻] ⁽¹⁾	mg/kg	< 1000	< 500
Matières organiques (teneur totale en C)	ppm	< 100	< 100

- (1) Superposition simplifiée en présence des deux sels
- (2) Il est recommandé de vérifier systématiquement la résistivité et les teneurs en sels
- (3) En présence de sulfures S²⁻, substituer par [SO₄²⁻] + 3 [S²⁻]