

La corrosion bactérienne

Françoise FEUGEAS

Laboratoire d'ingénierie des surfaces

INSA - LISS

24, bd de la Victoire

67000 STRASBOURG

BIOCORROSION DES ACIERS

Biocorrosion : Corrosion Induite par les Microorganismes (CIM) dont la présence dans les biofilms fixés sur les aciers entraîne des réactions électrochimique et/ou chimiques à la surface des aciers.

Exemples de secteurs industriels touchés par la CIM :

Industrie nucléaire (circuit de refroidissement)

Industries chimiques

Industrie du pétrole

Industrie alimentaire

Industries mécaniques (fluides de coupe)

Industrie aéronautique (réservoir d'avions)

Industrie de traitement des eaux

BIOCORROSION DES ACIERS

Coût global de la corrosion : 4% du PNB
des pays industrialisés

28 milliards d'euros pour la France

Biocorrosion : 10%

BIOCORROSION DES ACIERS EN EAU DOUCE

Cas de biocorrosion des aciers au carbone en milieu industriel

Acier	Industrie	bactéries
au carbone	réacteur nucléaire à eau pressurisée (REP) échangeur de chaleur	* <i>B.S.R.</i> * bactéries produisant des acides
au carbone	réservoir	* <i>B.S.R. (Desulfovibrio)</i> * bactéries aérobies non identifiée
au carbone E26	canalisation dans une centrale nucléaire	* productrice de NH_4^+
API grade 5 LX42	canalisation de gaz (CH_4^+ 0,2% CO_2) et accumulation d'eau dans les zones corrodées	* <i>Clostridia</i> * <i>Butyribacteria</i>
doux 1018	système d'injection d'eau	* <i>B.S.R.</i> * <i>Pseudomonas sp.</i>
SAE 1009	tube d'échangeur de chaleur et pipelines (industrie chimique)	* <i>Pseudomonas sp.</i> * pas de B.S.R. * champignons (hyphes) n'existent que lorsque le temps de séjour est long (>10 j)
ST3	réservoir d'eau	* <i>Bacillus putrificus</i>

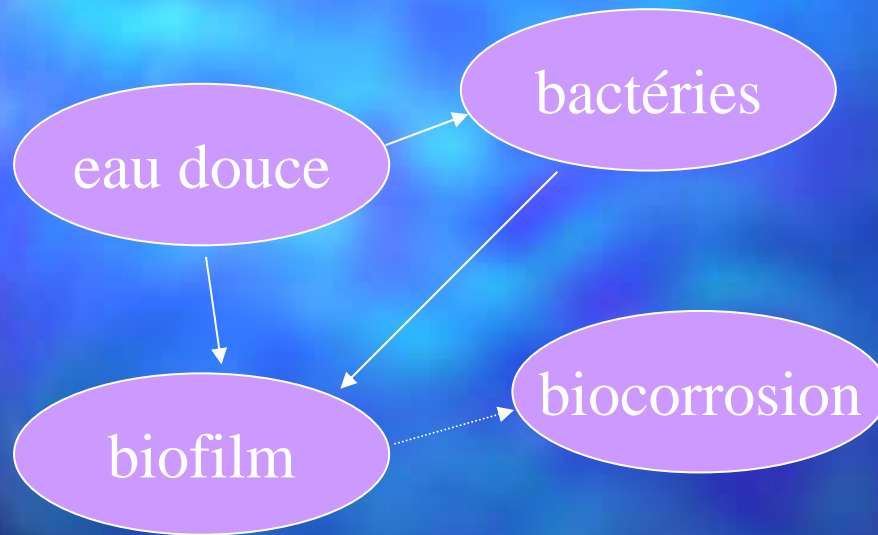
BIOCORROSION DES ACIERS EN EAU DOUCE

Cas de biocorrosion des aciers inoxydables en milieu industriel

Acier	Industrie	Bactéries
303	usine de papier (axe d'un cylindre)	
304	échangeur de chaleur (eau de rivière de Caroline du Nord)	* <i>Gallionella</i>
304	condenseur	* bactéries sulfato-réductrices * autres bactéries
304	tube de condenseur avec une forte vitesse d'écoulement.	* bactéries ferro manganiques
304 L	échangeur de chaleur industrie nucléaire	* 50% produit des acides organiques * 60% ont une activité nitrate réductase * Présence de bactéries thermophiles (45°C)
304 L	tour de refroidissement	* <i>Pseudomonas</i> * <i>Sphaerotilus</i> * <i>Desulfovibrio</i>
304 L	clarificateur d'usine à papier, circuit des eaux blanches (pH 6-7, 40-46°C)	* <i>Pseudomonas</i> * <i>Aerobacter</i> * <i>Flavobacterium</i> * <i>Bacillus</i> * <i>Desulfovibrio</i> * <i>Desulfatamaculum</i> * <i>Clostridium</i>
304 L	eau douce et stagnante	* <i>Gallionella</i>
304 L	tube dans un système d'eau	* <i>Gallionella</i>
316	échangeur de chaleur et pipelines	* <i>Pseudomonas</i> sp. * pas de bactéries sulfato-réductrices * champignons (hyphes) n'existent que lorsque le temps de séjour est long (>10 j)
321	Circuit de refroidissement de machine à papier	* bactéries sulfato-réductrices

BIOCORROSION DES ACIERS EN EAU DOUCE

Problème du diagnostic :



Critère de temps :

- Rapidité

Critère morphologique :

- Piqûres
- Cavernes à orifice d'entrée de faible diamètre

Critère biologique :

- Bactéries dans les dépôts et produits de corrosion

Evaluation des risques de Biocorrosion en eau potable

Conditions expérimentales :

- Immersion :
 - échantillons polis immergés dans un puits
 - 8-9 m sous le niveau statique de l'aquifère
 - eau stagnante : 12-18°C; pH 7,4
 - 2 à 2,9 mg/l d'oxygène dissous
 - essais laboratoires- eau stérilisée
- Echantillons :
 - acier au carbone (*0.38% C*)
 - aciers inoxydables (*316L, 304L, 304*)
- Formation des biofilms :
 - MEB, EDX & ESEM (analyses par spectrométrie à dispersion d'énergie)

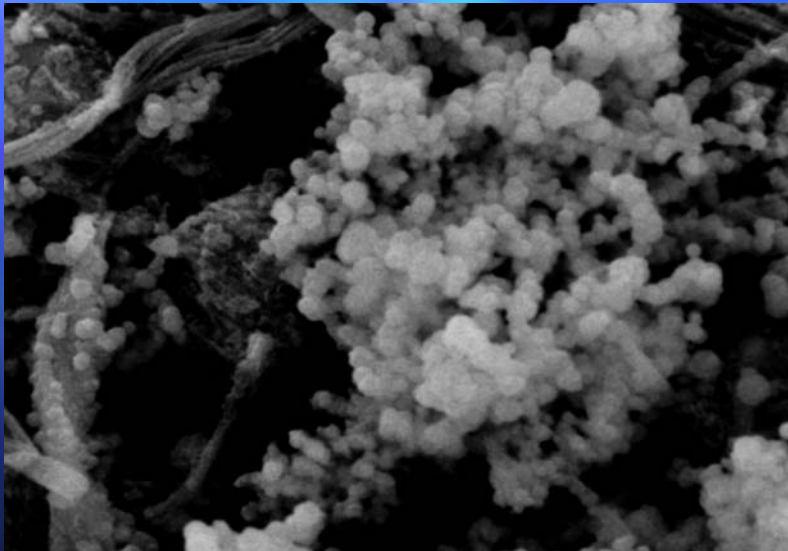
Evaluation des risques de Biocorrosion en eau potable

Conditions expérimentales :

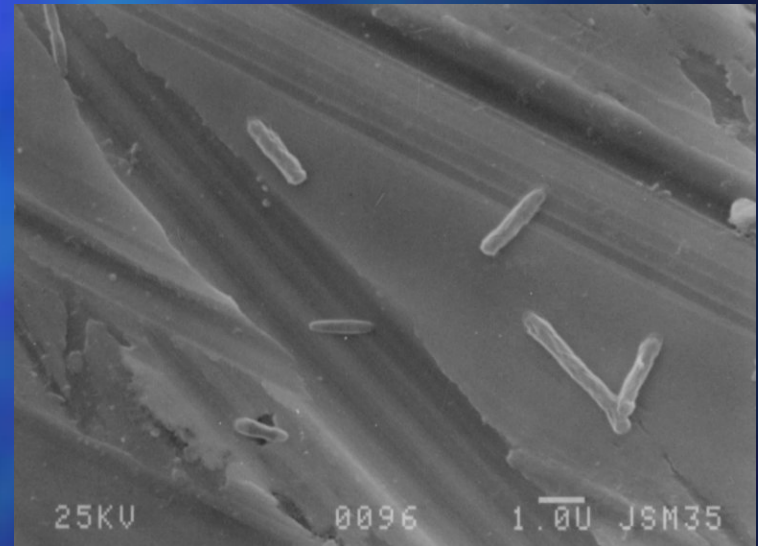
- Caractérisation des biofilms :
 - TEM+EDX+SAED (diffraction électronique)
 - analyses par rayons X (*diffraction & energy dispersive fluorescence*)
 - cultures bactériennes (*BSR & BTR*)
 - technique de préparation des échantillons
- Action des biofilms :
 - mesures électrochimiques *in situ* et non destructives (*E_{corr}(t), R_p*)
 - analyses microtopographiques

Caractérisation de biofilms

- Développement du biofilm en fonction de la nature du support en milieu naturel



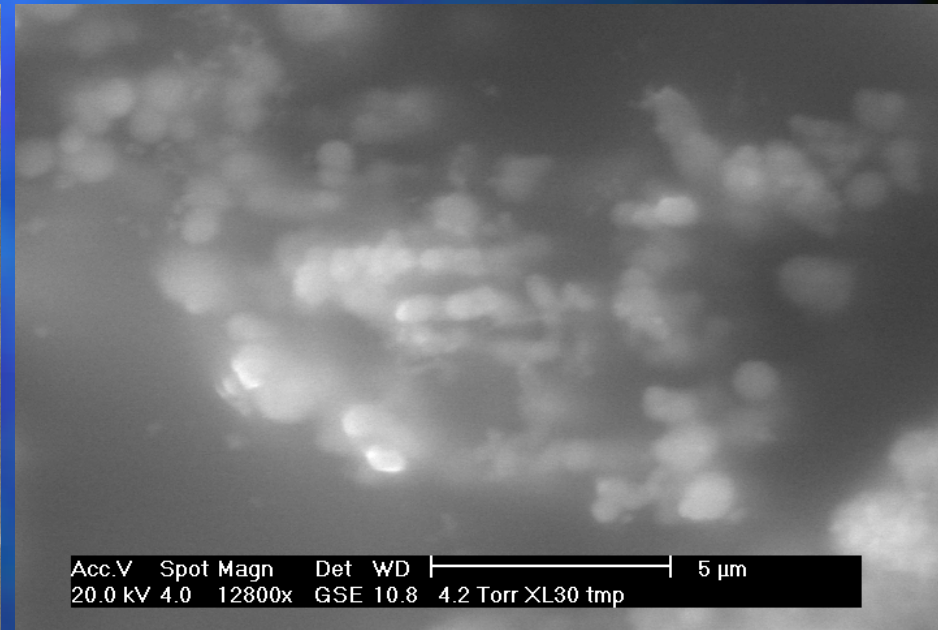
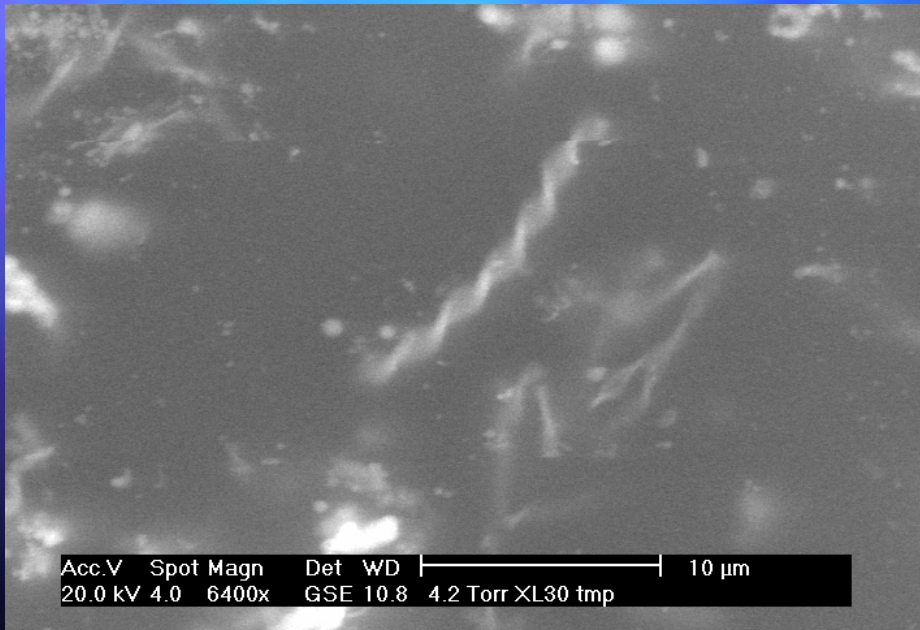
Biofilm (30j) sur acier au carbone (MEB)



Biofilm (50j) sur acier inoxydable (MEB)

Caractérisation de biofilms

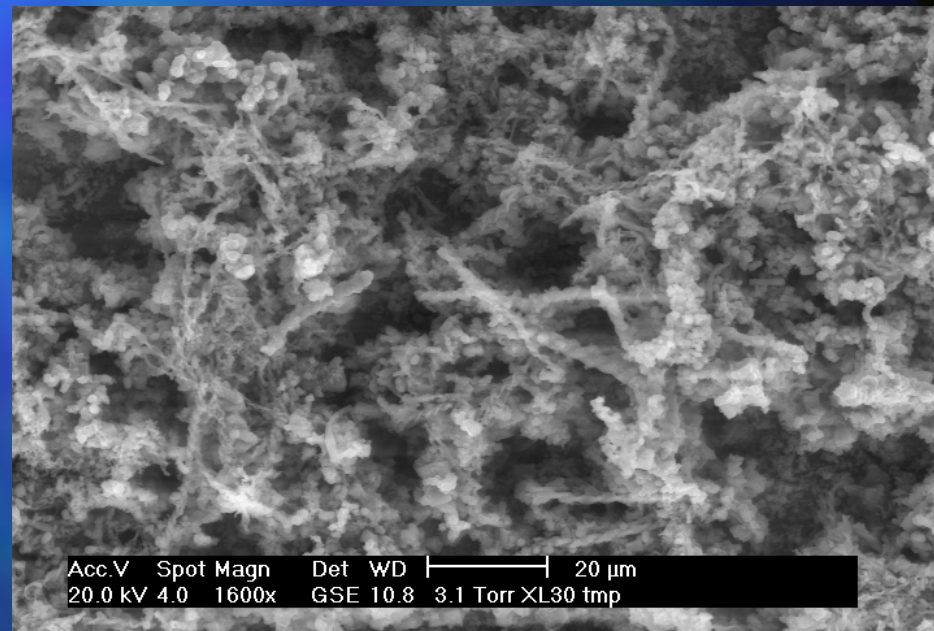
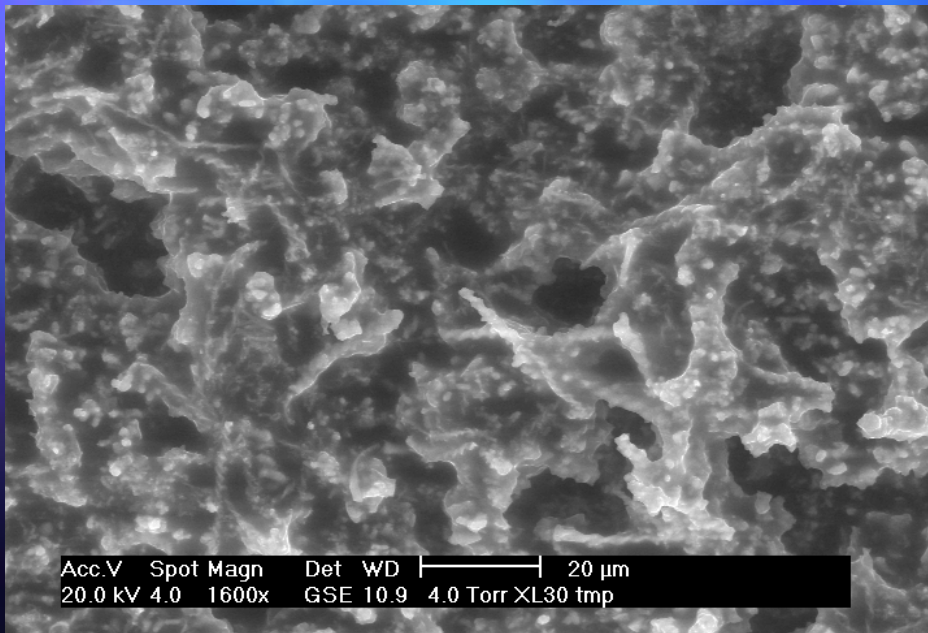
- Effets de la déshydratation



**Biofilms sur acier au carbone (3 ans)
Observations en mode ESEM**

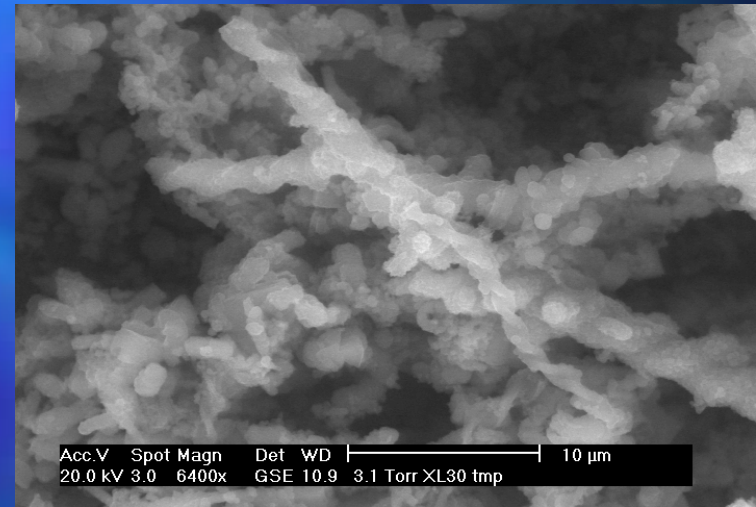
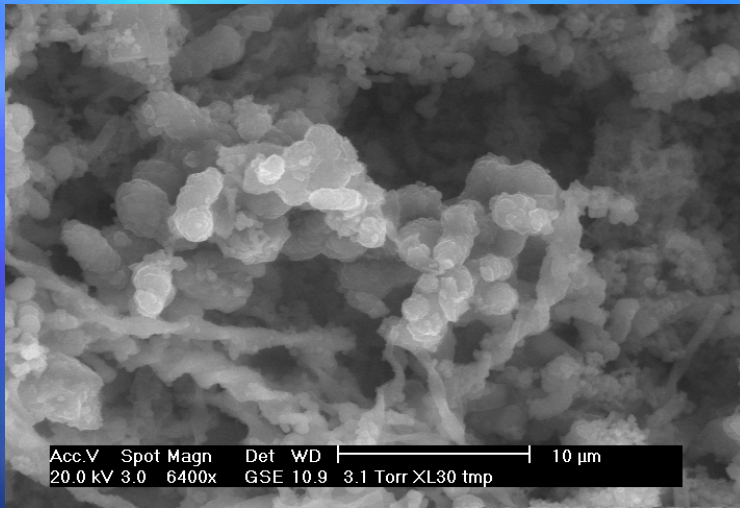
Caractérisation de biofilms

- Effets de la déshydratation



**Biofilms sur acier au carbone (3 ans)
Observations en mode ESEM**

Caractérisation de biofilms



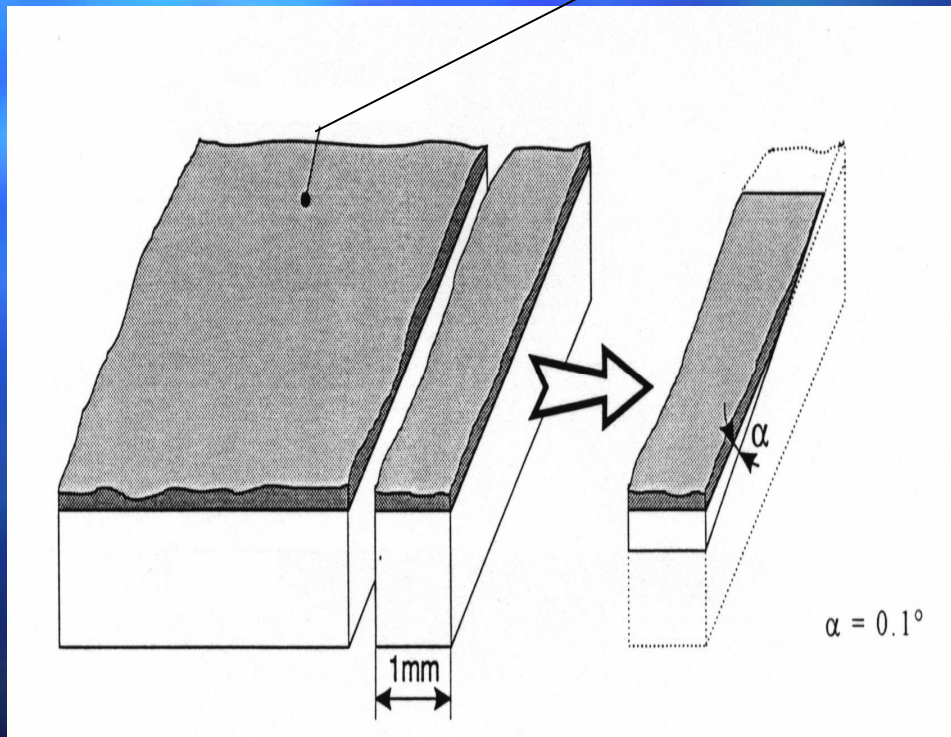
Biofilms sur acier au carbone (3 ans)

Observations en mode ESEM

Caractérisation de biofilms

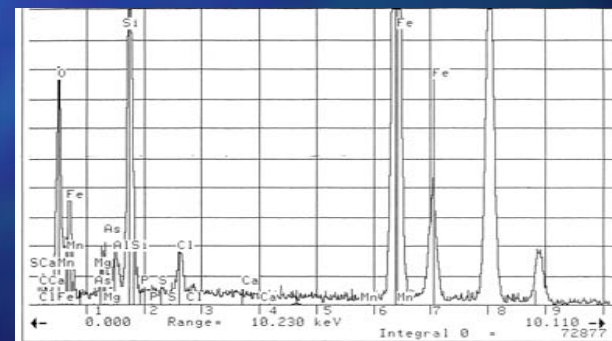
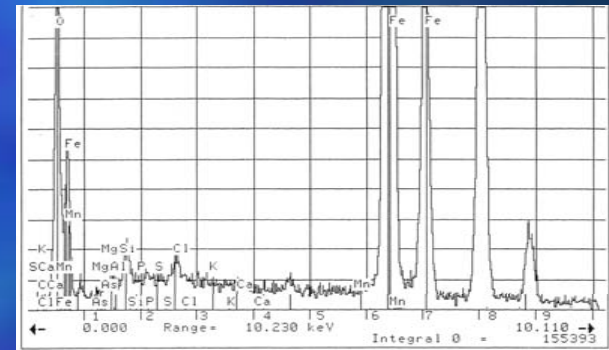
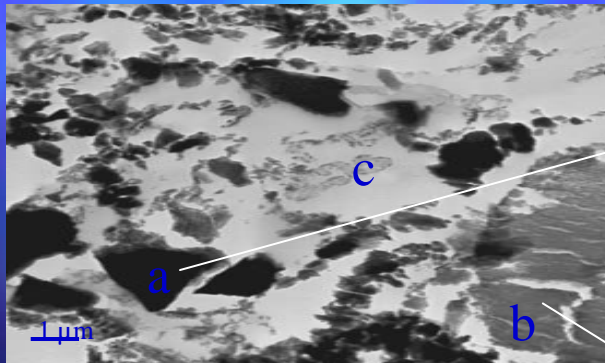
Technique de préparation :

Biofilm inclus



Caractérisation de biofilms

■ Biofilms sur aciers au carbone



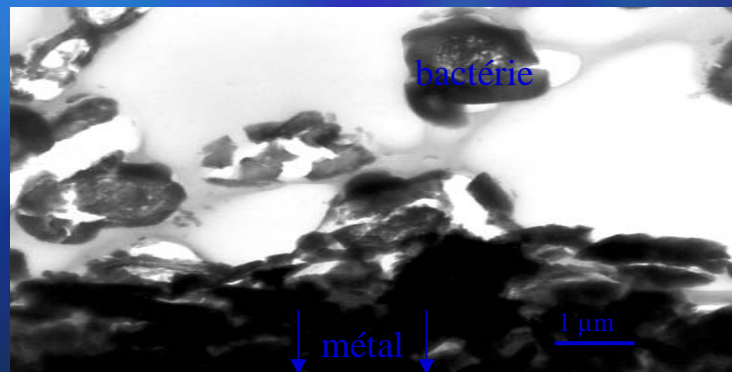
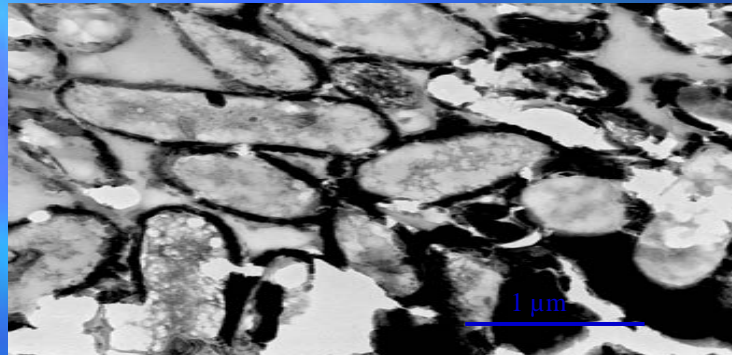
a : rouille

b : cristaux riches en Si

c : bactéries

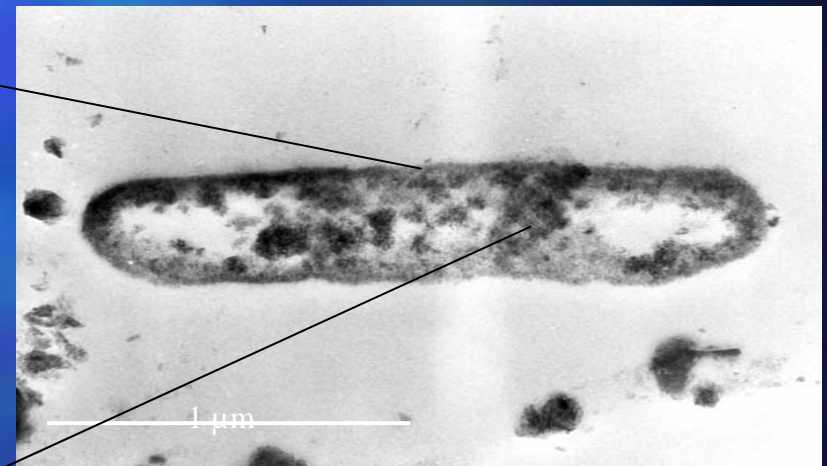
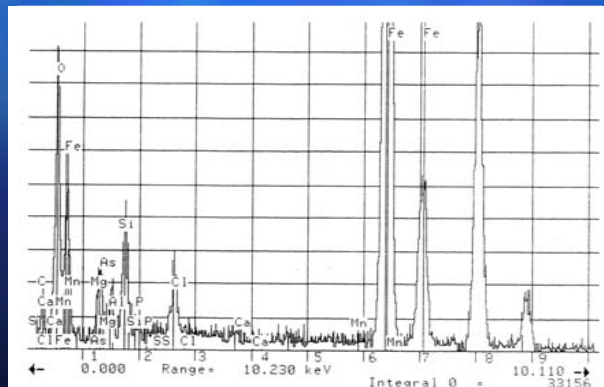
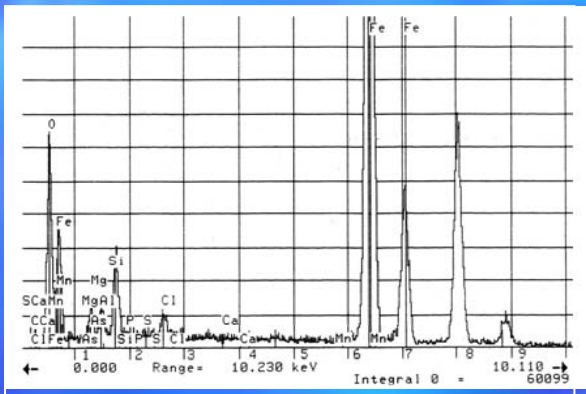
Caractérisation de biofilms

- Biofilms sur aciers au carbone



Caractérisation de biofilms

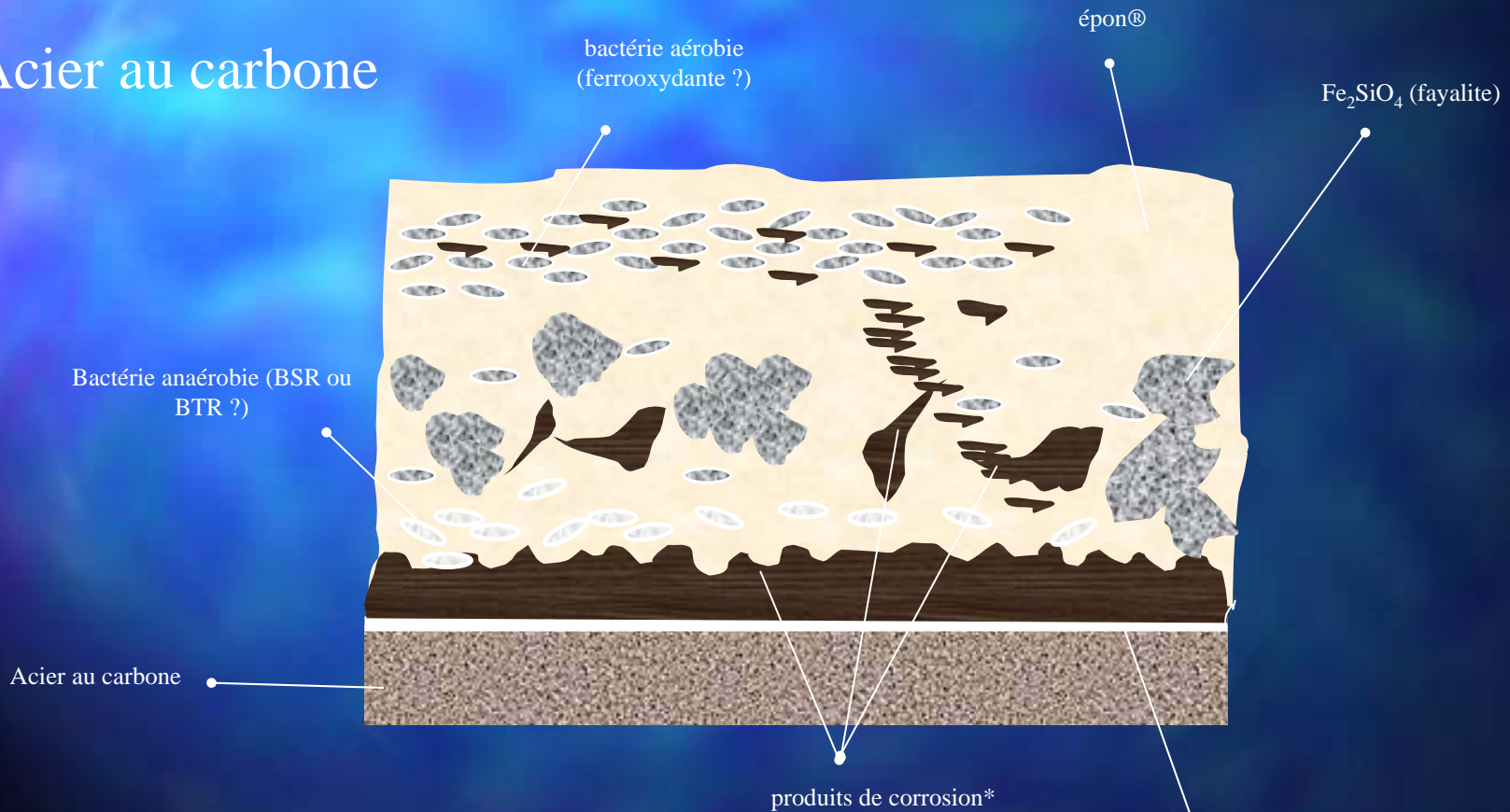
Bactérie (acier au carbone)



Morphologie majoritaire

Caractérisation de biofilms

Acier au carbone

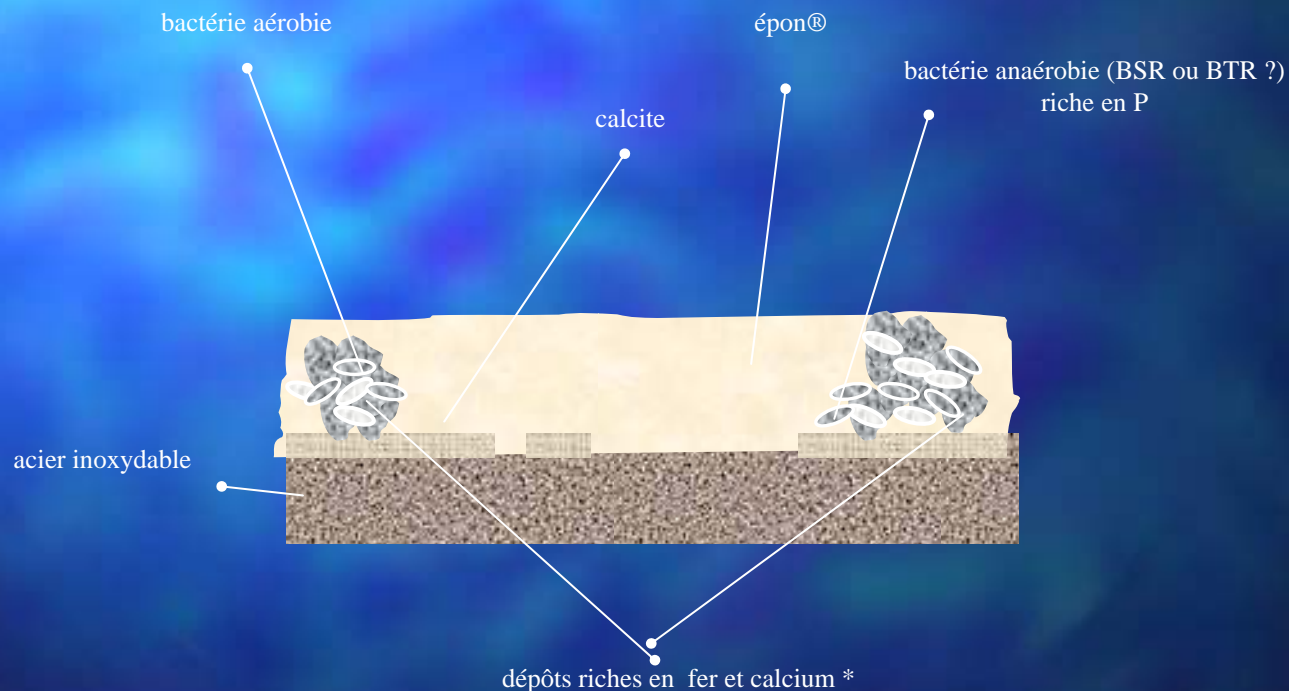


* = $\alpha\text{FeO}(\text{OH})$; $\text{Fe}(\text{OH})_3$; Fe_2O_3 ; $\text{Fe}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

CaCO_3 (aragonite)

Caractérisation de biofilms

Aciers inoxydables



* = $\text{Ca}_3\text{Fe}_2(\text{OH})_{12}$; CaFeSiO_4 ; $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$; CaCO_3

Caractérisation de biofilms

Influence du biofilm sur les produits de corrosion
(acier au carbone)

In situ samples	Sterile samples
Goethite $\alpha FeO(OH)$	Goethite $\alpha FeO(OH)$
Maghemite Fe_2O_3	Lepidocrocite $\gamma FeO(OH)$
Hisingerite $Fe_2Si_2O_5(OH)_4 \cdot 2H_2O$	Magnetite Fe_3O_4

Caractérisation de biofilms

Influence du biofilm sur la formation de carbonate de calcium (acier au carbone)

Essais in situ	Eau stérile
Film fin d'aragonite adhérent à la surface du métal	Déposition non uniforme de calcite et d'aragonite

Caractérisation de biofilms

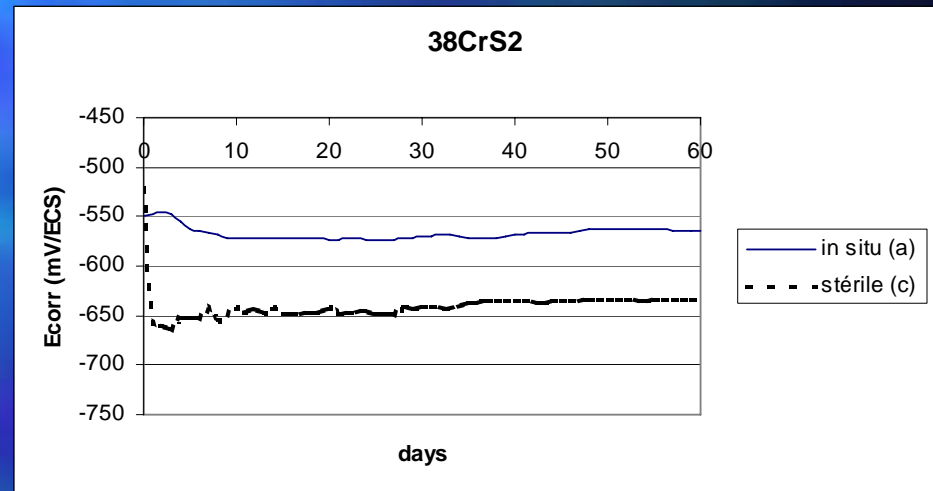
- ➔ Présence de BSR sur les aciers au carbone, inoxydables 316L et 304L mais pas sur 304.
- ➔ Présence de chlore (ions Cl^-) liée à la présence des bactéries pour tous les aciers : bactéries sur les zones anodiques

Influence des biofilms sur la corrosion

Influence du biofilm sur la corrosion généralisée de l'acier au carbone :

In situ : $0,04 \text{ mm/an} < v < 0,05 \text{ mm/an}$

Stérile : $0,08 \text{ mm/an} < v < 0,1 \text{ mm/an}$

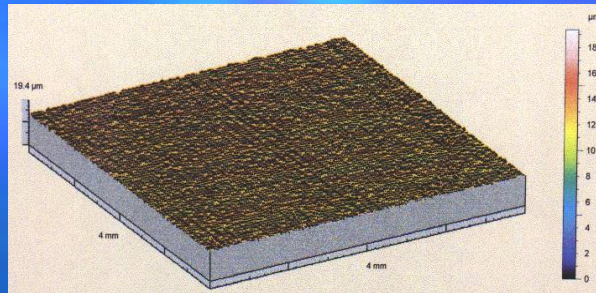


Le biofilm influence la formation de carbonate de calcium qui inhibe la corrosion généralisée.

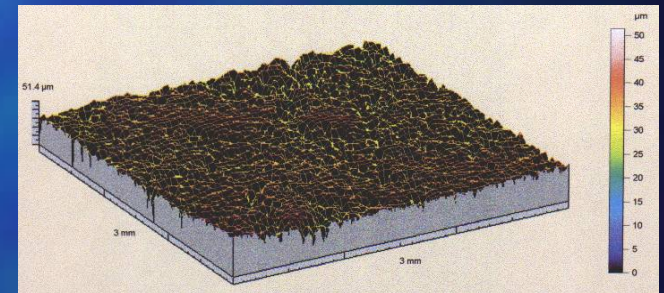
Influence des biofilms sur la corrosion

Influence du biofilm sur la corrosion localisée de l'acier au carbone :

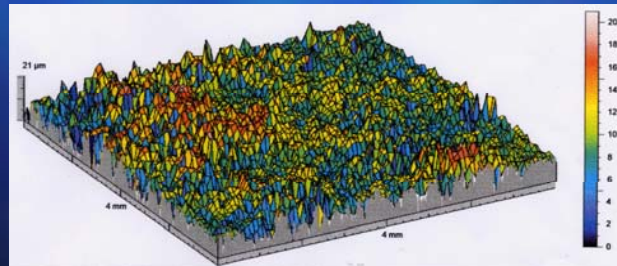
État initial



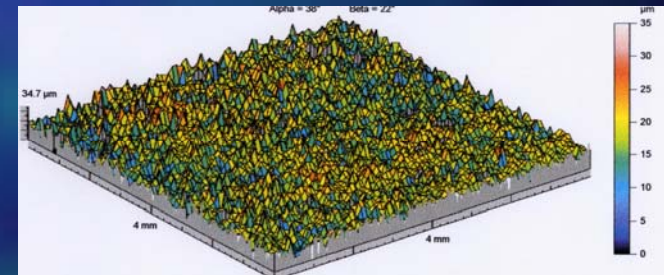
Après 80 j (puits)



Après 80 j eau stérile



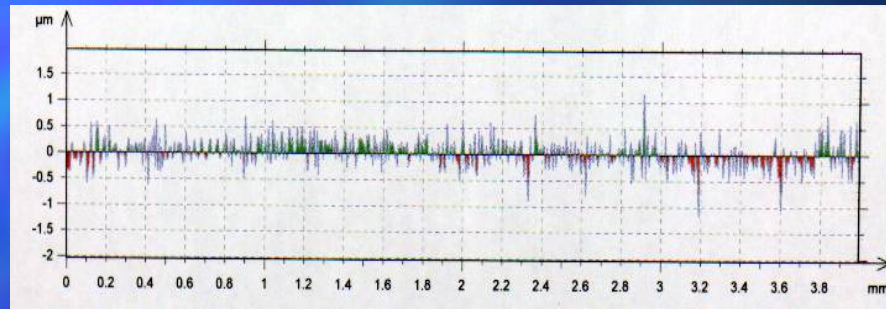
Après 3 a (puits)



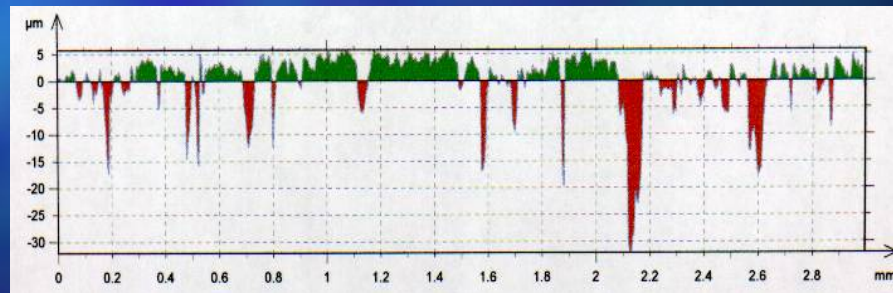
Influence des biofilms sur la corrosion

Influence du biofilm sur la corrosion localisée de l'acier au carbone :

État initial :
profondeur piqûres
moins de $1,5 \mu\text{m}$



Après 80 j (puits) :
profondeur piqûres
moins de $31,5 \mu\text{m}$

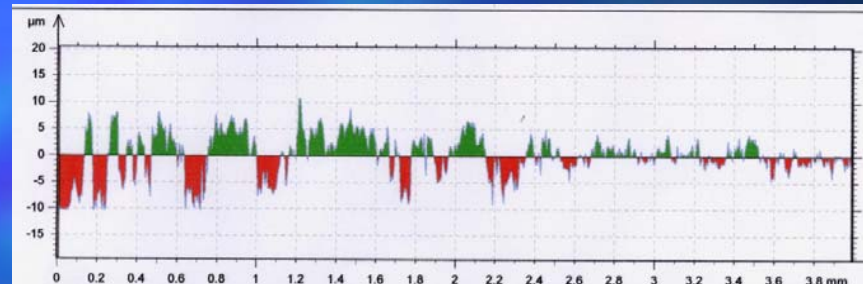


Influence des biofilms sur la corrosion

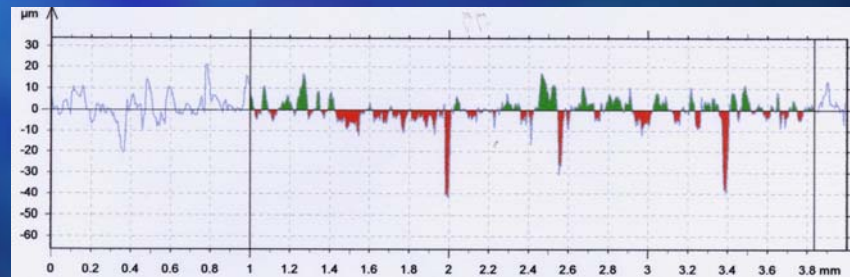
corrosion

Influence du biofilm sur la corrosion localisée de l'acier au carbone :

Après 80 j (eau stérile) :
profondeur piqûres
moins de $10,5 \mu\text{m}$

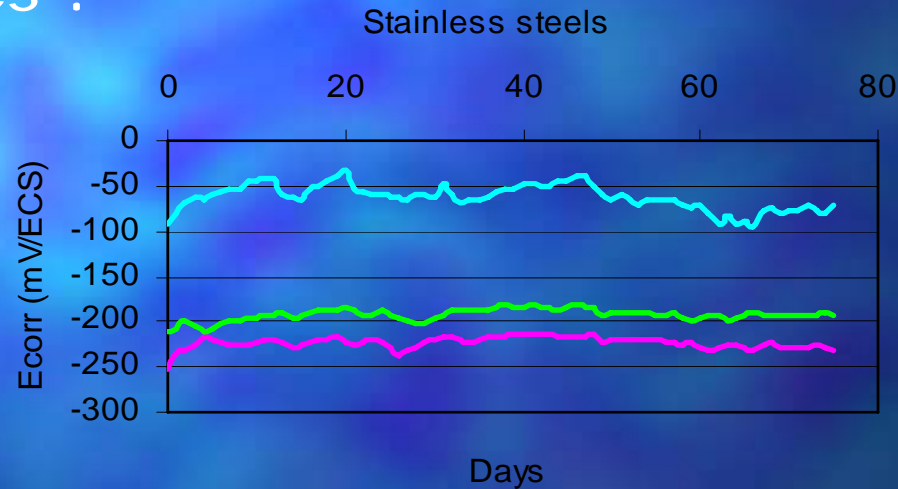


Après 3 ans (puits) :
profondeur piqûres
moins de $45,5 \mu\text{m}$



Influence des biofilms sur la corrosion

Influence du biofilm sur la corrosion des aciers inoxydables :



Pas d'action du biofilm

Biodétérioration des bétons

- Pierre reconstituée :

ciment de Portland + sable + eau

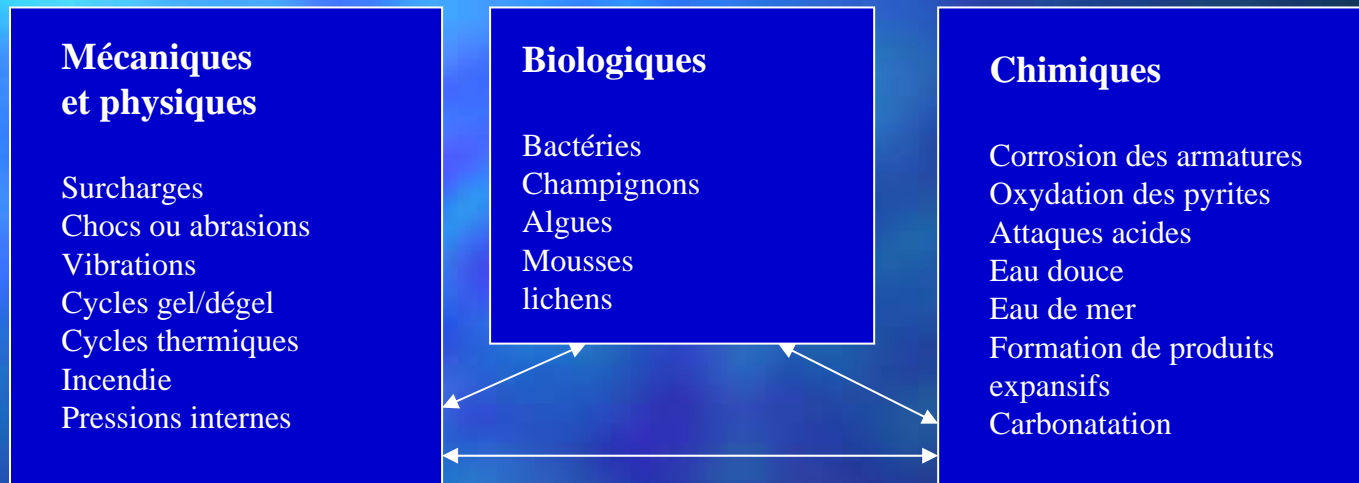
→ Bioréceptivité des échantillons immergés dans le puits

→ Interactions : biofilms



caractéristiques pétrophysique, pétrochimique des mortiers

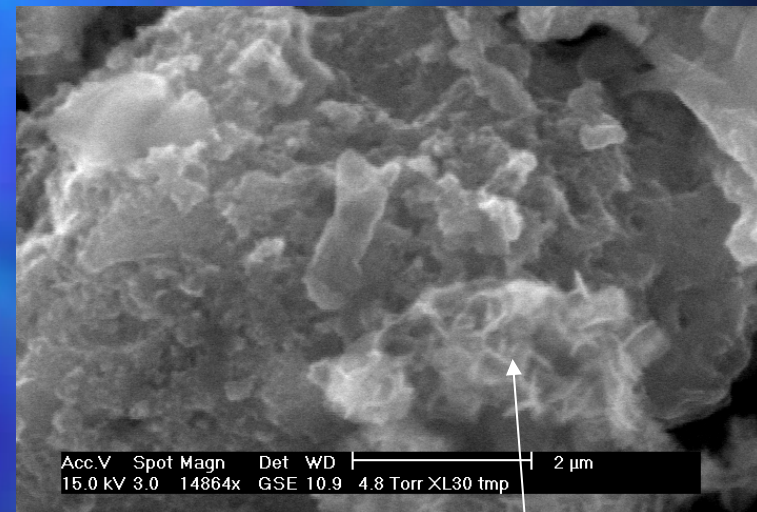
Biodétérioration des bétons



Biodétérioration des mortiers



Échantillon de mortier (6 mois dans le puits)
en ciment de Portland



C₃S hydraté : structure en
éponge (silicate de calcium
hydraté qui recouvre le grain)

Biodétérioration des mortiers

Ciment :

- Tobermorite $2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{CaO} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (70% de CSH)
- Portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (20 %)
- Ettringite $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SO}_4 \cdot \text{Ca} \cdot 32\text{H}_2\text{O}$

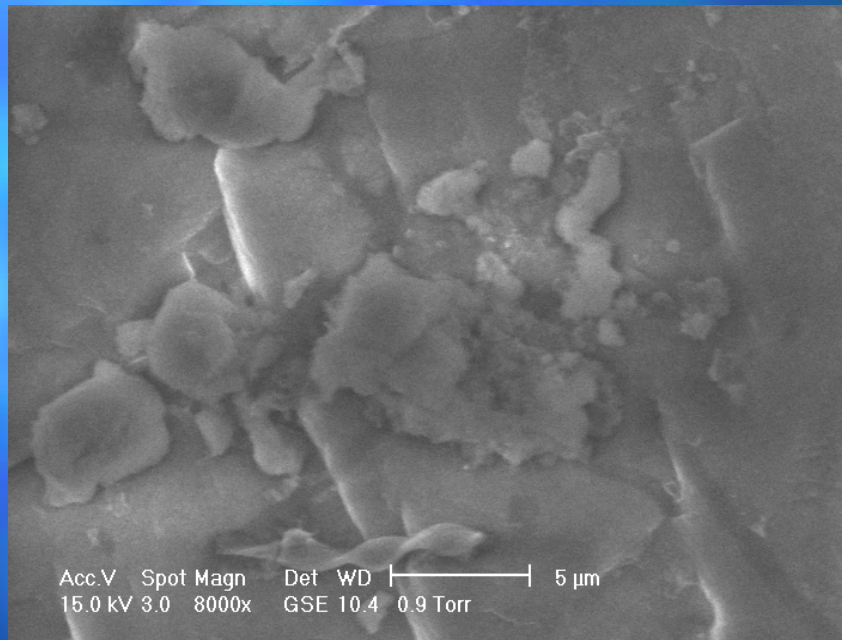
Carbonatation :



$\Rightarrow \text{pH} \downarrow \Rightarrow \text{développement biofilm} \uparrow$

$\Rightarrow \text{Porosité} \uparrow \Rightarrow \text{carbonatation} \uparrow$

Biodétérioration des mortiers



Échantillon de mortier (3 ans dans le puits)
en ciment de Portland

Biodétérioration des mortiers

- **Comment se manifestent la bioaltération et/ou la biodégradation des bétons ?**

Bioaltération :

- ➔ taches de couleur à la surface du matériau, effet des cycles climatiques
- ➔ organismes très variés : bactéries, champignons, algues, lichens mousses.

Biodétérioration des mortiers

- Comment se manifestent la bioaltération et/ou la biodégradation des bétons ?

Biodégradation

peut entraîner de forts dommages vis-à-vis de la structure même de l'ouvrage. Deux causes principales :

- la dégradation du béton,
- la dégradation des armatures métalliques (béton armé et précontraint).

Biodétérioration des mortiers

- Comment se manifestent la bioaltération et/ou la biodégradation des bétons ?

La dégradation du béton

* formation de produits de corrosion expansifs :

gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

ettringite ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$)

* dissolution de la matrice cimentaire par la formation de composés solubles :

nitrate de calcium ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$)

bicarbonate de calcium ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$)

Biodétérioration des mortiers

- **Comment se manifestent la bioaltération et/ou la biodégradation des bétons ?**

La dégradation des armatures métalliques

- Les produits de corrosion du fer sont expansifs
- augmentation du volume des armatures
- augmentation des contraintes internes dans le béton
- éclatement plus ou moins profond du matériau.