

# Sommaire

<b>Préface</b> .....	III
----------------------	-----

<b>Liste des auteurs</b> .....	V
--------------------------------	---

---

<b>Thème 1. Physico-chimie des surfaces</b> .....	1
---	---

<b>CHAPITRE 1 : Introduction à la physico-chimie des surfaces</b> .....	3
---	---

<b>1.1. Généralités</b> .....	3
-------------------------------	---

<b>1.2. Tension superficielle et mouillabilité</b> .....	4
--	---

1.2.1. <i>Concepts</i> .....	4
------------------------------	---

1.2.2. <i>Applications</i> .....	8
----------------------------------	---

<b>1.3. Adsorption</b> .....	10
------------------------------	----

<b>1.4. Surfaces chargées</b> .....	14
-------------------------------------	----

1.4.1. <i>Concepts</i> .....	14
------------------------------	----

1.4.2. <i>Interactions entre surfaces chargées</i> .....	17
--	----

<b>1.5. Caractérisation et modification des surfaces</b> .....	20
--	----

<b>1.6. Remerciements</b> .....	21
---------------------------------	----

<b>CHAPITRE 2 : Matériaux de construction : généralités et caractéristiques physico-chimiques</b> .....	23
---	----

<b>2.1. Généralités – ciments, mortiers et bétons</b> .....	23
---	----

2.1.1. <i>Le ciment Portland</i> .....	24
--	----

2.1.2. <i>Les ciments aluminates de calcium</i> .....	27
---	----

2.1.3. <i>Les ciments modernes : combinaisons de matériaux minéraux</i> ..	28
--	----

<b>2.2. Prise et durcissement – principes fondamentaux de la cristallisation</b> .....	29
--	----

2.2.1. <i>Notions d'équilibre de solubilité, de sous- et de sur-saturation</i> ..	29
---	----

2.2.2. <i>Germmination</i> .....	32
----------------------------------	----

2.2.3. <i>Croissance cristalline</i> .....	35
--	----

2.2.4. <i>Application des principes de la cristallisation au ciment Portland</i> .....	36
--	----

2.2.5.	<i>Application des principes de la cristallisation aux ciments aluminates de calcium . . . . .</i>	39
<b>2.3.</b>	<b>La chimie de surface des ciments hydratés . . . . .</b>	<b>41</b>
2.3.1.	<i>Charges de surface et potentiel <math>\zeta</math>. . . . .</i>	41
2.3.2.	<i>Conséquences pour les matériaux cimentaires. . . . .</i>	43
<b>2.4.</b>	<b>Conclusion . . . . .</b>	<b>44</b>
<b>CHAPITRE 3 :</b>	<b>Interactions microorganismes-bétons. . . . .</b>	<b>49</b>
<b>3.1.</b>	<b>Généralités . . . . .</b>	<b>49</b>
<b>3.2.</b>	<b>Paramètres influençant la bioréceptivité des matériaux cimentaires . . . . .</b>	<b>50</b>
3.2.1.	<i>Relations entre ces paramètres et la bioréceptivité . . . . .</i>	51
3.2.2.	<i>Énergie de surface . . . . .</i>	52
3.2.3.	<i>Mesures d'angles de contact. . . . .</i>	54
<b>3.3.</b>	<b>Mesures de l'évolution des propriétés de surfaces de pâtes cimentaires avec la technique de mesure d'angles dynamiques. . . . .</b>	<b>55</b>
3.3.1.	<i>Mise en œuvre. . . . .</i>	55
3.3.2.	<i>Évolution des angles de contact en fonction du temps . . . . .</i>	57
3.3.3.	<i>Évolution des angles de contact en fonction du diamètre . . . . .</i>	58
<b>3.4.</b>	<b>Conclusion . . . . .</b>	<b>63</b>

---

## **Thème 2. Les biofilms : des acteurs de la biodétérioration . . . . .**

<b>CHAPITRE 4 :</b>	<b>La cellule bactérienne : unité fonctionnelle du biofilm . . . . .</b>	<b>67</b>
<b>4.1.</b>	<b>Introduction . . . . .</b>	<b>67</b>
<b>4.2.</b>	<b>Les microorganismes . . . . .</b>	<b>69</b>
<b>4.3.</b>	<b>Diversité de microorganismes et de leurs habitats . . . . .</b>	<b>69</b>
<b>4.4.</b>	<b>Structures et fonctions de la cellule bactérienne. . . . .</b>	<b>71</b>
4.4.1.	<i>Le cytoplasme et son contenu, le nucléoïde. . . . .</i>	72
4.4.2.	<i>La membrane cytoplasmique . . . . .</i>	73
4.4.3.	<i>Les enveloppes bactériennes . . . . .</i>	74
4.4.4.	<i>Appendices, filaments et extensions cytoplasmiques. . . . .</i>	79
<b>4.5.</b>	<b>Le métabolisme chez les bactéries . . . . .</b>	<b>82</b>
4.5.1.	<i>Respiration des chimioorganotrophes aérobies . . . . .</i>	85
4.5.2.	<i>Chimioolithotrophes aérobies . . . . .</i>	86
4.5.3.	<i>Les respirations anaérobies . . . . .</i>	88
4.5.4.	<i>Les fermentations. . . . .</i>	92

4.5.5.	<i>Stratification et arrangements spatio-métaboliques, syntrophies</i> . . . . .	93
4.5.6.	<i>Couplages de métabolismes biotiques et abiotiques</i> . . . . .	96
<b>CHAPITRE 5 : Mode de vie en biofilm pour le peuple microscopique des surfaces</b> . . . . . 101		
5.1.	<b>Le biofilm, un mode de vie qui nous concerne</b> . . . . .	101
5.2.	<b>Un chantier perpétuel</b> . . . . .	103
5.3.	<b>Un ciment organique complexe pour maintenir l'édifice</b> . . . . .	106
5.4.	<b>Des édifices presque indestructibles</b> . . . . .	109
5.4.1.	<i>La matrice extracellulaire comme bouclier protecteur</i> . . . . .	110
5.4.2.	<i>Différenciation et adaptation physiologique</i> . . . . .	111
5.4.3.	<i>Le biofilm comme moteur de la plasticité génétique des bactéries</i> . . . . .	112
5.4.4.	<i>Le quorum-sensing, un véritable réseau social pour les microbes</i> . . . . .	113
5.4.5.	<i>Biofilms pluri-microbiens : plus fort en consortium</i> . . . . .	114
5.5.	<b>Comment vivre avec les biofilms</b> . . . . .	114
<b>CHAPITRE 6 : Voyage dans l'espace intercellulaire des biofilms : nature, cohésion et fonctions des exopolymères</b> . . 131		
6.1.	<b>Chimie des EPS de biofilms environnementaux</b> . . . . .	132
6.2.	<b>Fonctionnalités associées aux EPS des biofilms</b> . . . . .	134
6.2.1.	<i>Interactions physico-chimiques entre EPS et cohésion du biofilm</i> . . . . .	135
6.2.2.	<i>Accumulation d'éléments métalliques et organiques par les EPS</i> . . . . .	142
6.2.3.	<i>Enzymes hydrolytiques associés aux EPS</i> . . . . .	143
6.2.4.	<i>Protection du biofilm contre les agents désinfectants</i> . . . . .	144
6.3.	<b>Conclusion</b> . . . . .	145
<b>CHAPITRE 7 : Biofilms en milieu marin : exemple des vasières intertidales et des structures métalliques portuaires</b> . . . . . 153		
7.1.	<b>Vie en biofilm des bactéries marines</b> . . . . .	153
7.2.	<b>Conséquences de l'établissement de biofilms sur l'activité humaine en milieu marin</b> . . . . .	154
7.3.	<b>Communautés bactériennes de deux exemples de biofilms en milieu marin pouvant avoir des impacts différents</b> . . . . .	157
7.3.1.	<i>Le biofilm des vasières intertidales</i> . . . . .	158
7.3.2.	<i>Le biofilm des structures métalliques portuaires</i> . . . . .	159
7.3.3.	<i>Les interactions au sein des biofilms marins</i> . . . . .	164
7.4.	<b>Conclusion</b> . . . . .	165

<b>CHAPITRE 8 : Les biofilms dans la gestion de la qualité microbienne des eaux destinées à la consommation humaine en cours de distribution</b> . . . . .	173
8.1. <b>Introduction</b> . . . . .	173
8.2. <b>De l'usine au robinet : un vaste réacteur chimique et biologique complexe à gérer</b> . . . . .	174
8.3. <b>Les interfaces eau-matériaux dans les réseaux d'EDCH</b> . . . . .	176
8.4. <b>Évolution des connaissances sur les causes des proliférations bactériennes dans les réseaux d'EDCH</b> . . . . .	178
8.4.1. <i>Matières organiques biodégradables</i> . . . . .	178
8.4.2. <i>Connaissances sur les biofilms</i> . . . . .	181
8.5. <b>Maîtriser les biofilms dans les réseaux d'EDCH</b> . . . . .	182
8.6. <b>Conclusion</b> . . . . .	184
<b>CHAPITRE 9 : Les biofilms dans les circuits de refroidissement industriels</b> . . . . .	189
9.1. <b>Introduction</b> . . . . .	189
9.2. <b>Biofilm et circuits de refroidissement évaporatif : risque sanitaire</b> . . . . .	190
9.2.1. <i>Circuits de refroidissement évaporatif</i> . . . . .	190
9.2.2. <i>Caractéristiques des biofilms dans les circuits</i> . . . . .	192
9.2.3. <i>Détection et mesure du biofilm</i> . . . . .	195
9.2.4. <i>« Risque légionelle » et rôle du biofilm</i> . . . . .	197
9.2.5. <i>Facteurs majeurs de risques sanitaires</i> . . . . .	198
9.2.6. <i>Stratégie de gestion du « risque légionelle »</i> . . . . .	201
9.3. <b>Biofilm dans un réseau de froid : le risque de corrosion</b> . . . . .	204
9.3.1. <i>Réseau d'eau de froid</i> . . . . .	204
9.3.2. <i>Caractéristiques des biofilms dans les réseaux de froid</i> . . . . .	205
9.3.3. <i>Danger lié à la corrosion induite par les microorganismes</i> . . . . .	206
9.3.4. <i>Facteurs de risque majeurs</i> . . . . .	207
9.3.5. <i>Stratégie de gestion du risque de corrosion</i> . . . . .	209
9.4. <b>Conclusion</b> . . . . .	211

---

## **Thème 3. Biocorrosion des matériaux métalliques** . . . . . 215

<b>CHAPITRE 10 : Méthodes électrochimiques : application à la biocorrosion</b> . . . . .	217
10.1. <b>Introduction</b> . . . . .	217

<b>10.2. Influence des EPS extraits de <i>Pseudomonas</i> NCIMB 2021 sur le comportement à la corrosion de l'alliage 70Cu-30Ni en eau de mer . . . . .</b>	<b>218</b>
10.2.1. <i>Conditions expérimentales.</i> . . . . .	218
10.2.2. <i>Résultats : mesures électrochimiques</i> . . . . .	221
10.2.3. <i>Mécanisme de corrosion</i> . . . . .	223
10.2.4. <i>Modélisation des données d'impédance</i> . . . . .	224
10.2.5. <i>Résultats : courant de corrosion.</i> . . . . .	228
<b>10.3. Influence des EPS extraits de <i>Desulfovibrio alaskensis</i> sur le comportement à la corrosion de l'acier doux St37-2 en eau de mer . . . . .</b>	<b>229</b>
10.3.1. <i>Conditions expérimentales.</i> . . . . .	229
10.3.2. <i>Résultats</i> . . . . .	230
<b>10.4. Conclusion</b> . . . . .	<b>232</b>
<b>CHAPITRE 11 : Les interactions fer-soufre dans les phénomènes de biocorrosion. . . . .</b>	<b>235</b>
<b>11.1. Introduction</b> . . . . .	<b>235</b>
<b>11.2. Corrosion marine des aciers au carbone.</b> . . . . .	<b>236</b>
11.2.1. <i>Rôle de la couche de produits de corrosion</i> . . . . .	237
11.2.2. <i>Description de la couche de produits de corrosion</i> . . . . .	239
<b>11.3. Corrosion des aciers en milieux argileux – couplages galvaniques</b> . . . . .	<b>243</b>
11.3.1. <i>Les hétérogénéités de la couche de produits de corrosion</i> . . . . .	243
11.3.2. <i>Couplages galvaniques et hétérogénéité de la couche de produits de corrosion</i> . . . . .	245
<b>11.4. Conclusion</b> . . . . .	<b>248</b>

---

## **Thème 4. Biodétérioration des matériaux non métalliques** . . . . . 253

<b>CHAPITRE 12 : Biodétérioration des matériaux cimentaires : interactions environnement – microorganismes – matériaux . . . . .</b>	<b>255</b>
<b>12.1. Introduction</b> . . . . .	<b>255</b>
<b>12.2. Interactions environnement – microorganismes</b> . . . . .	<b>256</b>
12.2.1. <i>Les algues et les cyanobactéries.</i> . . . . .	257
12.2.2. <i>Les champignons.</i> . . . . .	258
12.2.3. <i>Les bactéries</i> . . . . .	258

<b>12.3. Interactions environnement – matériaux cimentaires</b> . . . . .	260
12.3.1. <i>Vieillessement des matériaux cimentaires en fonction de l'environnement.</i> . . . . .	260
12.3.2. <i>Biocolonisation des matériaux cimentaires.</i> . . . . .	263
<b>12.4. Interactions microorganismes – matériaux cimentaires : biodétérioration</b> . . . . .	266
12.4.1. <i>Biodétérioration esthétique.</i> . . . . .	266
12.4.2. <i>Biodétérioration mécanique.</i> . . . . .	267
12.4.3. <i>Biodétérioration chimique / mécanique.</i> . . . . .	267
<b>12.5. Démarche scientifique d'étude de la biodétérioration des matériaux cimentaires</b> . . . . .	270
12.5.1. <i>Essais de laboratoire pour la biodétérioration esthétique.</i> . . . . .	272
12.5.2. <i>Essais de laboratoire pour la biodétérioration chimique / mécanique</i> . . . . .	273
<b>12.6. Conclusion</b> . . . . .	276
<b>CHAPITRE 13 : Biodétérioration des bétons</b> . . . . .	283
<b>13.1. Introduction</b> . . . . .	283
<b>13.2. Spécificités des bétons vis-à-vis des microorganismes</b> . . . . .	283
13.2.1. <i>Spécificité chimiques.</i> . . . . .	284
13.2.2. <i>Spécificités physiques</i> . . . . .	285
13.2.3. <i>Problématique de l'étude de la biodétérioration réelle des bétons</i> . . . . .	287
<b>13.3. Processus générique de biodétérioration</b> . . . . .	288
<b>13.4. Mesure de la biodétérioration du béton</b> . . . . .	292
13.4.1. <i>Propriétés physiques</i> . . . . .	292
13.4.2. <i>Propriétés chimiques.</i> . . . . .	293
<b>13.5. Amélioration de la résistance du béton.</b> . . . . .	293
13.5.1. <i>Composition du béton.</i> . . . . .	293
13.5.2. <i>Mise en œuvre.</i> . . . . .	294
<b>13.6. Différences entre une attaque chimique et une attaque biologique.</b> . . . . .	296
<b>13.7. Conclusion</b> . . . . .	297
<b>CHAPITRE 14 : Biodétérioration des matériaux cimentaires dans les ouvrages d'assainissement.</b> . . . . .	303
<b>14.1. Introduction</b> . . . . .	303
<b>14.2. Comment se concrétise la biodétérioration dans les ouvrages d'assainissement ?.</b> . . . . .	305
<b>14.3. L'hydrogène sulfuré : vecteur principal du phénomène de biodétérioration dans les ouvrages d'assainissement</b> . . . . .	308
<b>14.4. Impact de la biodétérioration sur les matériaux cimentaires</b> . . . . .	311

14.4.1.	<i>Influence de la composition chimique du matériau cimentaire sur leur durabilité dans les réseaux d'assainissement</i> . . . . .	313
14.4.2.	<i>Les revêtements polymères comme protection des matériaux cimentaires dans les réseaux d'assainissement</i> . . . . .	317
<b>14.5.</b>	<b>Essais <i>in situ</i> pour l'étude du phénomène de biodétérioration dans les réseaux d'assainissement.</b> . . . . .	<b>318</b>
14.5.1.	<i>Exposition en Afrique du Sud, le Virginia Experimental Sewer.</i> . . . . .	319
14.5.2.	<i>Exposition au Japon, université d'Hokkaido</i> . . . . .	320
14.5.3.	<i>Exposition en France, Ifsttar</i> . . . . .	320
<b>14.6.</b>	<b>Conclusion</b> . . . . .	<b>322</b>
<b>CHAPITRE 15 : Biodétérioration des œuvres d'art</b> . . . . .		<b>327</b>
<b>15.1.</b>	<b>Introduction</b> . . . . .	<b>327</b>
<b>15.2.</b>	<b>Microorganismes impliqués dans la biodétérioration des biens culturels</b> . . . . .	<b>328</b>
15.2.1.	<i>Les champignons inférieurs.</i> . . . . .	328
15.2.2.	<i>Les champignons supérieurs</i> . . . . .	330
15.2.3.	<i>Les bactéries non photosynthétiques</i> . . . . .	334
15.2.4.	<i>Les microorganismes photosynthétiques</i> . . . . .	334
<b>15.3.</b>	<b>Méthodes de détection appliquée aux champignons.</b> . . . . .	<b>337</b>
<b>15.4.</b>	<b>Altération des vitraux médiévaux suite à l'oxydation du manganèse.</b> . . . . .	<b>338</b>
<b>15.5.</b>	<b>Méthodes de traitement par rayonnements UV-C</b> . . . . .	<b>341</b>
<b>15.6.</b>	<b>Conclusion</b> . . . . .	<b>343</b>

---

## Thème 5. Conception et modification des matériaux . . . . . 347

<b>CHAPITRE 16 : Choix des matériaux métalliques et biocorrosion.</b> . . . . .		<b>349</b>
<b>16.1.</b>	<b>Introduction</b> . . . . .	<b>349</b>
<b>16.2.</b>	<b>Le titane et ses alliages</b> . . . . .	<b>351</b>
<b>16.3.</b>	<b>L'aluminium et ses alliages</b> . . . . .	<b>352</b>
<b>16.4.</b>	<b>Les aciers non alliés</b> . . . . .	<b>353</b>
16.4.1.	<i>Le facteur de piqûration.</i> . . . . .	354
16.4.2.	<i>Quantification de la corrosion généralisée en eaux naturelles.</i> . . . . .	356
<b>16.5.</b>	<b>Les aciers inoxydables</b> . . . . .	<b>361</b>
16.5.1.	<i>Milieux aérés</i> . . . . .	362
16.5.2.	<i>Milieux désaérés</i> . . . . .	364
16.5.3.	<i>Milieux mixtes (avec zones aérées et zones désaérées)</i> . . . . .	365
<b>16.6.</b>	<b>Remarques conclusives.</b> . . . . .	<b>367</b>

<b>CHAPITRE 17 : Les surfaces antimicrobiennes : un atout dans la lutte contre le développement des biofilms . . . .</b>	<b>371</b>
<b>17.1. Introduction . . . . .</b>	<b>371</b>
<b>17.2. Différents types de surfaces ou revêtements antimicrobiens . . . .</b>	<b>373</b>
17.2.1. <i>Surfaces nanostructurées . . . . .</i>	373
17.2.2. <i>Peptides antimicrobiens (AMPs) . . . . .</i>	375
17.2.3. <i>Polymère à propriété d'anti-adhésion, le polyéthylène glycol. . . .</i>	377
17.2.4. <i>Revêtement renfermant des nanoparticules (Ag, Cu, TiO<sub>2</sub>, ZnO, CuO) . . . . .</i>	378
17.2.5. <i>Polymères biocides (polymères cationiques hydrophobes, N-halamines) . . . . .</i>	380
<b>17.3. Focus sur les revêtements N-halamines (régénérables) . . . . .</b>	<b>381</b>
<b>17.4. Conclusion . . . . .</b>	<b>390</b>
<b>CHAPITRE 18 : Substances microbiennes extracellulaires pour les matériaux cimentaires . . . . .</b>	<b>395</b>
<b>18.1. Introduction : matériaux cimentaires et adjuvants . . . . .</b>	<b>395</b>
<b>18.2. Substances microbiennes extracellulaires . . . . .</b>	<b>396</b>
<b>18.3. Influence des SEC sur les performances mécaniques . . . . .</b>	<b>397</b>
18.3.1. <i>Propriétés rhéologiques . . . . .</i>	397
18.3.2. <i>Résistance à la compression. . . . .</i>	399
<b>18.4. Influence des SEC sur les caractéristiques physico-chimiques. . . .</b>	<b>401</b>
18.4.1. <i>Résistance à la compression. . . . .</i>	401
18.4.2. <i>Mécanismes d'hydratation . . . . .</i>	403
18.4.3. <i>Rugosité de pâtes de ciment . . . . .</i>	405
<b>18.5. Interaction entre substances extracellulaires et matériaux         cimentaires : action curative . . . . .</b>	<b>407</b>
18.5.1. <i>Béton autocatrisant. . . . .</i>	407
18.5.2. <i>Perméabilité des matériaux cimentaires. . . . .</i>	408
<b>18.6. Conclusion . . . . .</b>	<b>408</b>