

# Table des matières

<b>Introduction</b> . . . . .	1
Christine BLANC et Isabelle AUBERT	
<b>Chapitre 1. Fissuration « assistée » par l’environnement : quelques aspects critiques</b> . . . . .	3
Pierre COMBRADE	
1.1. Introduction . . . . .	3
1.2. Identification pratique de la sensibilité à la FAE . . . . .	5
1.3. Les processus de fissuration . . . . .	11
1.4. Conclusion . . . . .	22
1.5. Bibliographie . . . . .	23
<b>Partie 1. Les bases pour appréhender les problématiques de couplage mécanique – environnement – microstructure</b> . . . . .	27
<b>Chapitre 2. Les bases pour mieux appréhender les couplages en métallurgie physique</b> . . . . .	29
Mohamed GOUNÉ, Éric ANDRIEU, Yves BRÉCHET, Alexis DESCHAMPS, Joël DOUIN, Marc FIVEL et Angéline POULON-QUINTIN	
2.1. Structures et défauts . . . . .	29
2.2. Transformations de phases et ségrégation . . . . .	38
2.3. Influence des champs mécaniques . . . . .	44
2.4. Bibliographie . . . . .	52

<b>Chapitre 3. Mécanique des milieux continus</b> . . . . .	<b>55</b>
Philippe PILVIN	
3.1. Introduction . . . . .	55
3.2. Cinématique des milieux continus 3D . . . . .	57
3.3. Efforts intérieurs dans les milieux continus . . . . .	60
3.4. Approche thermodynamique des lois de comportement . . . . .	64
3.5. Bibliographie . . . . .	70
<b>Chapitre 4. Amorçage et propagation des fissures de fatigue</b> . . . . .	<b>71</b>
Véronique DOQUET, Gilbert HÉNAFF, Thierry PALIN-LUC et Marion RISBET	
4.1. Introduction . . . . .	71
4.2. Comportement mécanique cyclique, fatigue plastique . . . . .	71
4.3. Fatigue à grand et très grand nombre de cycles . . . . .	75
4.4. Propagation de fissure sous chargement cyclique . . . . .	80
4.5. Fissuration par fatigue en mode mixte . . . . .	88
4.6. Bibliographie . . . . .	92
<b>Chapitre 5. Chimie des surfaces et passivation des métaux et alliages</b> . . . . .	<b>99</b>
Philippe MARCUS, Élie PROTOPOPOFF et Vincent MAURICE	
5.1. Chimie des surfaces . . . . .	99
5.2. Passivation des métaux et alliages . . . . .	117
5.3. Bibliographie . . . . .	130
<b>Chapitre 6. Électrochimie à l'usage de la corrosion assistée mécaniquement</b> . . . . .	<b>133</b>
Sabrina MARCELIN, Bernard NORMAND, Roland OLTRA et Vincent VIVIER	
6.1. Éléments de conceptualisation de la corrosion assistée mécaniquement . . . . .	133
6.2. De l'analyse phénoménologique à l'analyse électrochimique . . . . .	138
6.3. Corrosion par rupture locale de l'intégrité du film passif . . . . .	141
6.4. Contribution physique associée à la réaction de réduction électrochimique : effets induits par la réaction de réduction du proton . . . . .	149
6.5. Phénomènes électrochimiques intervenant en milieu confiné . . . . .	150
6.6. Principes des mesures électrochimiques locales . . . . .	153

6.7. Conclusion . . . . .	155
6.8. Bibliographie . . . . .	156

**Chapitre 7. Notions fondamentales : outils de modélisation, de l'atome à l'échelle macroscopique . . . . . 161**

Charlotte BECQUART, Christophe DOMAIN, Marc FIVEL, Michel PEREZ  
et Ludovic THUINET

7.1. Introduction . . . . .	161
7.2. Échelle atomique . . . . .	161
7.3. Échelle mésoscopique . . . . .	169
7.4. Échelle macroscopique : plasticité cristalline . . . . .	176
7.5. Conclusion . . . . .	180
7.6. Bibliographie . . . . .	181

**Partie 2. Hydrogène et fragilisation des matériaux métalliques . . . 187**

**Chapitre 8. État de l'hydrogène dans la matière : mécanismes fondamentaux d'ad/absorption, piégeage et transport . . . . . 189**

Frantz MARTIN, Xavier FEUGAS, Abdelali OUDRISS, Dôme TANGUY,  
Laurent BRIOTTET et Jean KITTEL

8.1. Introduction . . . . .	189
8.2. Sources d'hydrogène et paramètres importants . . . . .	189
8.3. Adsorption . . . . .	191
8.4. Absorption – Dissolution . . . . .	196
8.5. Diffusion . . . . .	199
8.6. Piégeage . . . . .	201
8.7. Transport de l'hydrogène par les défauts mobiles . . . . .	205
8.8. Conclusion . . . . .	208
8.9. Bibliographie . . . . .	208

**Chapitre 9. Interactions hydrogène/défauts cristallins : effets sur la plasticité et la rupture . . . . . 219**

Xavier FEUGAS et David DELAFOSSE

9.1. Introduction . . . . .	219
9.2. Implication de l'hydrogène lors de la décohésion d'une interface . . . . .	220

---

9.3. Impact de l'hydrogène sur les processus de déformation plastique . . .	221
9.4. Fragilisation par la formation de lacunes . . . . .	229
9.5. Fragilisation par la formation d'hydrure . . . . .	230
9.6. Conclusion et questions ouvertes . . . . .	231
9.7. Bibliographie . . . . .	232
<b>Chapitre 10. Conséquences industrielles de la FPH . . . . .</b>	<b>245</b>
Laurent BRIOTTET, Rémi BATISSE, Pierre BERNARD, Claude DURET-THUAL, Jean-Loup HEUZÉ, Frantz MARTIN, Florian THEBAULT et Flavien VUCKO	
10.1. Introduction . . . . .	245
10.2. Secteurs de l'énergie. . . . .	246
10.3. L'hydrogène pour le transport . . . . .	255
10.4. Bibliographie . . . . .	265
<b>Chapitre 11. Techniques expérimentales de dosage et de détection de l'hydrogène . . . . .</b>	<b>269</b>
Abdelali OUDRISS, Frantz MARTIN et Xavier FEAUGAS	
11.1. Introduction . . . . .	269
11.2. Techniques expérimentales quantitatives ou semi-quantitatives de dosage. . . . .	270
11.3. Méthodes de localisation de l'hydrogène au sein d'une microstructure . . . . .	283
11.4. Synthèse générale . . . . .	291
11.5. Bibliographie . . . . .	293
<b>Partie 3. Corrosion sous contrainte . . . . .</b>	<b>299</b>
<b>Chapitre 12. Effet de la contrainte sur l'activité électrochimique : interactions métallurgie/contrainte et réactivité de surface . . . . .</b>	<b>301</b>
Vincent VIGNAL, Olivier DEVOS et Xavier FEAUGAS	
12.1. Introduction . . . . .	301
12.2. Modification structurale : les différentes contributions de la déformation . . . . .	302
12.3. Approche thermocinétique . . . . .	303
12.4. Vers une mesure du poids de chaque contribution : des exemples de l'impact de la mécanique. . . . .	306

12.5. Conclusion . . . . .	313
12.6. Bibliographie . . . . .	313

**Chapitre 13. Corrosion sous contrainte – Entre le défaut de corrosion et la fissure longue : la phase d’amorçage des fissures . . . . . 319**

Christine BLANC, Juan CREUS et Marie TOUZET-CORTINA

13.1. Introduction . . . . .	319
13.2. La phase d’incubation . . . . .	320
13.3. Amorçage de fissures : transition défauts-fissures courtes . . . . .	325
13.4. Propagation des fissures courtes . . . . .	332
13.5. Conclusion . . . . .	339
13.6. Bibliographie . . . . .	340

**Chapitre 14. Propagation de fissures de corrosion sous contrainte . . . . . 347**

Catherine GUERRE, Marion FRÉGONÈSE, Quentin AUZOUX, Isabelle AUBERT et Cécilie DUHAMEL

14.1. Introduction . . . . .	347
14.2. Mécanismes élémentaires physiques de propagation de fissures de CSC . . . . .	348
14.3. Étude de la propagation de fissures longues en CSC . . . . .	352
14.4. Multifissuration . . . . .	362
14.5. Conclusion – Limitations . . . . .	368
14.6. Bibliographie . . . . .	369

**Chapitre 15. Fissuration assistée par l’oxydation . . . . . 375**

Benoît TER-OVANESSIAN, Aurélien VILLANI, Éric ANDRIEU et Samuel FOREST

15.1. Introduction . . . . .	375
15.2. Une assistance multiprocessus : rôles de l’oxydation . . . . .	378
15.3. Du multiprocessus aux processus couplés . . . . .	382
15.4. Conclusion . . . . .	391
15.5. Bibliographie . . . . .	392

**Chapitre 16. Corrosion sous contrainte : de la fissuration en service aux études de laboratoire . . . . . 397**

Krzysztof WOLSKI, Pierre COMBRADE, François DUPOIRON,  
Claude DURET-THUAL et Fiona RUEL

16.1. Introduction . . . . .	397
16.2. Quelques aspects de la lutte contre la corrosion sous contrainte : construction d'un argumentaire avec des essais en laboratoire . . . . .	398
16.3. Quelques cas illustrant des problématiques particulières . . . . .	411
16.4. Conclusion . . . . .	418
16.5. Bibliographie . . . . .	419

**Partie 4. Fatigue – Corrosion . . . . . 421**

**Chapitre 17. Fatigue corrosion/fatigue hydrogène à différentes échelles . . . . . 423**

Nicolas SAINTIER, Mohamed EL MAY, Grégory ODEMER, Gilbert HÉNAFF,  
Cédric BOSCH, Xavier FEAUGAS et Thierry COUVANT

17.1. Introduction . . . . .	423
17.2. Fatigue endurance en situation de couplage fatigue – corrosion . . . . .	424
17.3. Amorçage et propagation des fissures courtes. . . . .	436
17.4. Rôle de l'environnement sur la propagation de fissures par fatigue . . . . .	440
17.5. Bibliographie . . . . .	445

**Chapitre 18. Modélisation à l'échelle locale des interactions plasticité-environnement. . . . . 453**

Isabelle AUBERT, Jamaa BOUHATTATE, Yann CHARLES, Thierry COUVANT,  
Matthieu DHONDT, Cécilie DUHAMEL, Marion FRÉGONÈSE,  
Monique GASPÉRINI, Gilbert HÉNAFF, Arnaud METSUE et Nicolas SAINTIER

18.1. Introduction . . . . .	453
18.2. Modélisation de l'incubation. . . . .	454
18.3. Modélisation de l'amorçage . . . . .	462
18.4. Propagation : processus d'extension . . . . .	464
18.5. Conclusion . . . . .	471
18.6. Bibliographie . . . . .	473

<b>Chapitre 19. Cas concrets de fatigue-corrosion</b> . . . . .	481
Cédric BOSCH et Nathalie PAUZE	
19.1. Introduction . . . . .	481
19.2. Microstructure de l'alliage . . . . .	482
19.3. Corrosion localisée. . . . .	483
19.4. Corrosion sous contrainte. . . . .	485
19.5. Fatigue-corrosion. . . . .	489
19.6. Conclusion . . . . .	499
19.7. Bibliographie . . . . .	499
<b>Partie 5. Compléments et ouverture vers des problématiques connexes</b> . . . . .	501
<b>Chapitre 20. Méthodes électrochimiques locales adaptées à l'étude des couplages environnement – microstructure – mécanique</b> . . . . .	503
Olivier DEVOS, Nadine PÉBÈRE, Vincent VIGNAL et Vincent VIVIER	
20.1. Introduction . . . . .	503
20.2. La microscopie électrochimique. . . . .	504
20.3. Les microcellules électrochimiques. . . . .	511
20.4. La spectroscopie d'impédance électrochimique locale (SIEL) . . . . .	514
20.5. La technique de mesure locale de potentiel (SRET) . . . . .	520
20.6. La technique de l'électrode vibrante (SVET) . . . . .	521
20.7. Conclusion . . . . .	522
20.8. Bibliographie . . . . .	523
<b>Chapitre 21. Essais mécaniques sous environnements corrosifs et sous hydrogène gazeux</b> . . . . .	529
Cédric BOSCH, Laurent BRIOTTET, Thierry COUVANT, Marion FRÉGONÈSE et Abdelali OUDRISS	
21.1. Introduction . . . . .	529
21.2. Essais mécaniques instrumentés pour l'analyse des transitoires de courants . . . . .	530
21.3. Instrumentation des essais mécaniques par corrélation d'images numériques. . . . .	533
21.4. Essais mécaniques sous atmosphère d'hydrogène gazeux. . . . .	536

21.5. Méthodologie d'essais mécaniques associant plasticité cristalline et analyse EBSD pour détecter l'amorçage de fissures . . . . .	540
21.6. Analyse du bruit électrochimique en CSC . . . . .	544
21.7. Essai de perméation électrochimique sous chargement mécanique. . . . .	547
21.8. Bibliographie . . . . .	552
<b>Chapitre 22. Fragilisation par les métaux liquides . . . . .</b>	<b>557</b>
Thierry AUGER, Jean-Bernard VOGT et Ingrid PRORIOL-SERRE	
22.1. Contexte de la fragilisation par les métaux liquides . . . . .	557
22.2. Définition et caractéristique de la fragilisation par les métaux liquides. . . . .	561
22.3. Mise en évidence de la fragilisation par métal liquide . . . . .	563
22.4. Mécanismes de la fragilisation par les métaux liquides . . . . .	571
22.5. Bibliographie . . . . .	579
<b>Liste des auteurs. . . . .</b>	<b>585</b>
<b>Index . . . . .</b>	<b>591</b>