

# Table des matières

<b>Préface</b> . . . . .	1
David EMBURY	
<b>Introduction</b> . . . . .	5
Mohamed GOUNÉ, Thierry IUNG et Jean-Hubert SCHMITT	
<b>Chapitre 1. Écrouissage et propriétés en traction.</b> . . . . .	13
Mohamed GOUNÉ et Olivier BOUAZIZ	
1.1. Éléments introductifs . . . . .	13
1.2. Courbe contrainte/déformation : grandeurs macroscopiques . . . . .	14
1.3. Comportement d'une structure monophasée : approche microscopique . . . . .	15
1.3.1. Limite d'élasticité . . . . .	15
1.3.2. Écrouissage et plasticité . . . . .	16
1.4. Écrouissage et comportement mécanique des aciers micro-alliés durcis par précipitation. . . . .	19
1.4.1. Éléments introductifs . . . . .	19
1.4.2. Identification des différentes contributions à l'écrouissage . . . . .	20
1.4.3. Matériaux de référence et données de l'analyse théorique . . . . .	23
1.4.4. Écrouissage et propriétés mécaniques : effet de la taille de grains . . . . .	24
1.4.5. Écrouissage et propriétés mécaniques : effets de la précipitation. . . . .	27
1.5. Écrouissage et comportement mécanique des aciers martensitiques. . . . .	30
1.5.1. Structure multi-échelle et propriétés mécaniques . . . . .	30
1.5.2. Propriétés en traction et écrouissage . . . . .	32

1.5.3. Effet du carbone sur les évolutions de $YS_{0.2}$ et UTS . . . . .	33
1.6. Aciers austénitiques Fe-0,6C-22Mn à effet TWIP . . . . .	34
1.6.1. Éléments introductifs . . . . .	34
1.6.2. Rôle des macles et nature de l'écroissage . . . . .	35
1.6.3. Écroissage et comportement mécanique de l'acier Fe-0,6C-22Mn. . . . .	36
1.6.4. Évolution de la limite d'élasticité . . . . .	38
1.7. Aciers multiphasés dits <i>Quenching and Partitionning</i> (Q&P) . . . . .	39
1.7.1. Des aciers <i>Dual Phase</i> , TRIP aux aciers Q&P . . . . .	39
1.7.2. Approches phénoménologiques du comportement mécanique des aciers multiphasés . . . . .	42
1.7.3. Propriétés mécaniques et écroissage des aciers Q&P . . . . .	44
1.8. Conclusion . . . . .	49
1.9. Bibliographie . . . . .	50

## **Chapitre 2. Anisotropie et propriétés mécaniques . . . . .** 53

Hélène RÉGLÉ et Brigitte BACROIX

2.1. Problématiques . . . . .	54
2.1.1. La problématique des textures dans les aciers modernes . . . . .	54
2.1.2. La problématique des textures de transformation de phase . . . . .	55
2.2. Anisotropie texturale et propriétés mécaniques. . . . .	56
2.2.1. Les orientations typiques de la ferrite . . . . .	57
2.2.2. Les orientations typiques de l'austénite . . . . .	62
2.2.3. Les orientations typiques de transformation de phase. . . . .	63
2.3. Conclusion . . . . .	71
2.4. Détail des calculs . . . . .	72
2.4.1. Comment calculer le module de Young d'un polycristal texturé ? . . . . .	72
2.4.2. Comment calculer le coefficient de Lankford d'un polycristal texturé ? . . . . .	74
2.4.3. Comment calculer la surface de plasticité d'un polycristal texturé ? . . . . .	76
2.5. Bibliographie . . . . .	77

## **Chapitre 3. Compromis entre résistance et tenue à la rupture . . .** 79

Anne-Françoise GOURGUES-LORENZON et Thierry IUNG

3.1. Introduction . . . . .	79
3.2. Les méthodes de mesure de la résistance à l'endommagement et à la rupture . . . . .	79
3.2.1. Allongement à rupture . . . . .	80

3.2.2. Résilience en flexion par choc . . . . .	83
3.2.3 Ténacité : résistance à la propagation instable d'une fissure . . . . .	85
3.3. Mécanismes physiques et contrôle microstructural de l'endommagement et de la rupture . . . . .	87
3.3.1. Rupture fragile transgranulaire par clivage . . . . .	88
3.3.2. Rupture ductile par cavitation. . . . .	91
3.3.3. Rupture fragile intergranulaire . . . . .	94
3.3.4. Synthèse sur les mécanismes de rupture. . . . .	96
3.4. Exemples de mise en application . . . . .	96
3.4.1. Ténacité et ultra-haute résistance. . . . .	96
3.4.2. Résistance à la rupture des nuances multiphasées . . . . .	101
3.5. Conclusion . . . . .	106
3.6. Bibliographie. . . . .	106

## **Chapitre 4. Compromis entre résistance mécanique et tenue en fatigue . . . . .**

109

Véronique FAVIER, André GALTIER, Rémi MUNIER et Bastien WEBER

4.1. La fatigue : la cause principale de la rupture des pièces en service. . . . .	109
4.2. La fatigue : de l'amorçage de fissures à la rupture . . . . .	110
4.2.1. Les approches pour déterminer le risque de rupture par fatigue . . . . .	110
4.2.2. Les mécanismes d'amorçage de fissures . . . . .	113
4.2.3. Les mécanismes de propagation de fissures . . . . .	114
4.2.4. Augmenter la résistance maximale ou le seuil de propagation ? Approche de Kitagawa-Takahashi pour la nocivité d'un défaut. . . . .	117
4.3. Comment améliorer la tenue en fatigue par la métallurgie ? . . . . .	118
4.3.1. Lien entre résistance maximale et résistance à la fatigue. . . . .	118
4.3.2. Repousser l'amorçage ou l'activation de la plasticité aux plus fortes contraintes. . . . .	120
4.3.3. Freiner la propagation des fissures . . . . .	123
4.4. Rôle croissant des défauts dans les aciers à très haute résistance . . . . .	128
4.4.1. Approche de Murakami : petits défauts et fissures courtes. . . . .	128
4.4.2. Diminution de la résistance en fatigue d'aciers trempés et revenus en présence d'inclusions de type sulfure. . . . .	130
4.5. Traitements spécifiques pour la tenue en fatigue. . . . .	131
4.5.1. Traitements thermo-chimiques. . . . .	131
4.5.2. Traitements mécaniques . . . . .	132
4.5.3. Cas des soudures . . . . .	132

4.6. Conclusion . . . . .	133
4.7. Bibliographie . . . . .	134

## **Chapitre 5. Aciers à haute résistance et revêtements . . . . . 137**

Marie-Laurence GIORGI et Jean-Michel MATAIGNE

5.1. Introduction . . . . .	137
5.2. Le procédé de galvanisation en continu . . . . .	138
5.2.1. Mécanismes mis en jeu lors de l'interaction acier/métal liquide . . . . .	138
5.2.2. Composés intermétalliques et revêtement . . . . .	140
5.3. Oxydation sélective pendant le recuit continu . . . . .	146
5.3.1. Stabilité thermodynamique des oxydes . . . . .	147
5.3.2. Diffusion réactive . . . . .	150
5.4. Les revêtements sur les aciers à haute résistance . . . . .	152
5.4.1. Mouillage par les métaux liquides des aciers partiellement oxydés . . . . .	153
5.4.2. Adaptations du procédé pour galvaniser des aciers à haute résistance . . . . .	156
5.4.3. Utilisation d'autres procédés de revêtement . . . . .	162
5.5. Conclusion . . . . .	163
5.6. Bibliographie . . . . .	164

## **Chapitre 6. Aciers à hautes caractéristiques mécaniques résistants à la corrosion . . . . . 169**

Franck TANCRET, Christine BLANC et Vincent VIGNAL

6.1. Introduction . . . . .	169
6.2. Principes généraux de corrosion/oxydation et de résistance à la corrosion/oxydation . . . . .	170
6.3. Aciers résistants à la corrosion humide et à haute tenue mécanique . . . . .	171
6.3.1. Aciers autopatinables . . . . .	171
6.3.2. Aciers inoxydables . . . . .	175
6.3.3. Liens procédés-corrosion : exemples en fabrication additive . . . . .	180
6.4. Alliages résistants à l'oxydation à chaud et au fluage . . . . .	185
6.4.1. Aciers ferritiques-martensitiques « 9-12 Cr » . . . . .	187
6.4.2. Aciers austénitiques formeurs d'alumine . . . . .	190
6.5. Conclusion . . . . .	193
6.6. Bibliographie . . . . .	194

<b>Chapitre 7. Résistance au crash par des aciers</b> . . . . .	<b>197</b>
Dominique CORNETTE, Pascal DIETSCH, Kevin TIHAY et Sébastien ALLAIN	
7.1. Introduction et problématique industrielle. . . . .	197
7.2. Les essais en vigueur, ou comment passer du comportement du véhicule complet au comportement du matériau ? . . . . .	198
7.2.1. Essai sur véhicule complet . . . . .	198
7.2.2. Essais sur composants et critères de performance et d'évaluation. . . . .	199
7.2.3. Essais sur éprouvettes simples (vitesse de déformation et déformation à rupture) . . . . .	202
7.3. Paramètres influant sur le matériau lors de la chaîne de fabrication et du comportement en service . . . . .	214
7.3.1. Mise en forme/découpe . . . . .	214
7.3.2. Assemblage (soudage par point) . . . . .	216
7.3.3. Traitement de cuisson peinture . . . . .	218
7.4. Adéquation entre les propriétés du matériau et le comportement au crash en fonction des différents critères d'évaluation . . . . .	219
7.4.1. Effort d'anti-intrusion . . . . .	219
7.4.2. Effort moyen d'écrasement – Absorption d'énergie. . . . .	220
7.4.3. Ductilité/rupture du matériau en crash. . . . .	222
7.4.4. Ductilité/rupture des assemblages en crash : cas particulier de la zone affectée thermiquement. . . . .	226
7.5. Conclusion . . . . .	227
7.6. Bibliographie. . . . .	228
<b>Chapitre 8. Tenue des bords découpés.</b> . . . . .	<b>231</b>
Stéphane GODET, Ève-Line CADOTTE et Astrid PERLADE	
8.1. Introduction/problématique . . . . .	231
8.2. Procédés de découpe et caractéristiques du bord découpé . . . . .	232
8.2.1. Les différents procédés de découpe . . . . .	232
8.2.2. Description du bord poinçonné ou cisailé . . . . .	232
8.2.3. Paramètres influant sur la qualité de découpe par cisailage ou poinçonnage . . . . .	235
8.3. Comportement du bord découpé . . . . .	238
8.3.1. Les différents essais de caractérisation du bord . . . . .	238
8.3.2. Paramètres influant sur le comportement du bord découpé . . . .	241
8.3.3. Comportement du bord en service : cas de la fatigue et du crash . . . . .	248
8.3.4. Comportement en bord découpé des grandes familles d'aciers . . . . .	250

8.3.5. Modélisation du bord découpé dans les codes d'emboutissage par éléments finis . . . . .	255
8.4. Conclusion . . . . .	256
8.5. Bibliographie . . . . .	256

**Chapitre 9. Compromis entre résistance mécanique et fragilisation par hydrogène . . . . . 259**

Xavier FEAUGAS et Colin SCOTT

9.1. Introduction . . . . .	259
9.2. Comment identifier et caractériser la fragilisation par l'hydrogène ? . . . . .	260
9.2.1. Analyse fractographique . . . . .	260
9.2.2. Analyse chimique et microstructurale . . . . .	261
9.2.3. Essais mécaniques en laboratoire . . . . .	263
9.3. Coefficients de solubilité et de diffusion (apparente) de l'hydrogène dans les aciers . . . . .	264
9.3.1. Les sources d'hydrogène (intrinsèques/environnementales) . . . . .	264
9.3.2. Le transport de l'hydrogène dans les aciers . . . . .	267
9.3.3. Des indices de la fragilisation par l'hydrogène . . . . .	271
9.4. Étude de cas : fragilisation des aciers pour fixations . . . . .	272
9.4.1. Incidents récents de rupture en service . . . . .	272
9.4.2. Description phénoménologique et paramètres de sensibilité . . . . .	273
9.4.3. Aciers martensitiques – Stratégies industrielles . . . . .	275
9.5. Étude de cas : fragilisation par l'hydrogène des tôles minces . . . . .	279
9.5.1. Cas spécifique : acier TWIP austénitique . . . . .	280
9.5.2. Aciers TWIP – Stratégies industrielles . . . . .	282
9.6. Recherches et perspectives . . . . .	287
9.7. Bibliographie . . . . .	290

**Chapitre 10. Soudabilité des aciers à haute résistance . . . . . 297**

Thomas DUPUY, Jessy HAOUAS et Laurent JUBIN

10.1. Introduction . . . . .	297
10.1.1. Généralités . . . . .	297
10.1.2. Modifications microstructurales en ZAT (zone affectée thermiquement) . . . . .	299
10.2. Problématiques de soudabilité . . . . .	301
10.2.1. Adoucissement en ZAT et ZF . . . . .	301
10.2.2. Ténacité-résilience . . . . .	305
10.2.3. Fissuration à froid . . . . .	306
10.2.4. Fissuration à chaud . . . . .	311
10.2.5. Fissuration au réchauffage . . . . .	314

---

10.2.6. LME – Fragilisation par les métaux liquides . . . . .	315
10.3. Solutions pour une bonne soudabilité des aciers THR. . . . .	316
10.3.1. Produits d’apport . . . . .	316
10.3.2. Traitements thermiques après soudage. . . . .	317
10.3.3. Conception d’un acier THR soudable . . . . .	319
10.4. Bibliographie . . . . .	321
<b>Annexe. Brefs rappels sur la métallurgie des aciers . . . . .</b>	<b>325</b>
Thierry IUNG et Jean-Hubert SCHMITT	
<b>Postface. Les aciers à très haute résistance, et après ? . . . . .</b>	<b>365</b>
François MUDRY	
<b>Liste des auteurs. . . . .</b>	<b>373</b>
<b>Index . . . . .</b>	<b>377</b>