

Introduction	1
--------------	---

## A

---

### Les bases métallurgiques

<b>1 • Structure cristalline des métaux</b>	<b>7</b>
1.1 Métaux purs	7
1.2 Alliages	14
<b>2 • Comment se déforme un métal</b>	<b>19</b>
2.1 Rappels de mécanique	19
2.2 Déformation des cristaux	21
2.3 Les dislocations	25
2.4 L'écrouissage	32
2.5 Le vieillissement	33
<b>3 • Les caractéristiques mécaniques</b>	<b>36</b>
3.1 Généralités	36
3.2 L'essai de traction uniaxiale	38
<b>4 • Caractéristiques mesurées</b>	<b>40</b>
4.1 Module d'Young	40
4.2 Transition élastique-plastique progressive	42
4.3 Palier de limite d'élasticité	43
4.4 Consolidation	46
4.5 Striction diffuse	47
4.6 Striction localisée	50
4.7 Rupture	52
4.8 Allongement à rupture	53

<b>5 • Conditions d'essai</b>	<b>56</b>
5.1 Les différentes éprouvettes	56
5.2 Influence des conditions d'essai	59
5.3 Intérêt de l'essai de traction	59
<b>6 • Grandeurs rationnelles</b>	<b>61</b>
6.1 Contraintes et déformations vraies	61
6.2 Courbe de traction rationnelle	62
6.3 Loi de consolidation de Hollomon	64
6.4 Quelques précisions sur n et k	66
6.5 Autres lois courantes	69
<b>7 • L'anisotropie</b>	<b>73</b>
7.1 Les différentes formes d'anisotropie	73
7.2 Anisotropie plastique	74
7.3 Anisotropie planaire	75
<b>8 • Phénomènes connexes</b>	<b>77</b>
8.1 Retour élastique	77
8.2 Essais interrompus et inversés	78
8.3 Effet Bauschinger	79
8.4 Relaxation	80

## **B**

---

### Les tôles d'acier

<b>9 • Élaboration des tôles</b>	<b>83</b>
9.1 Usine à chaud	83
9.2 Usine à froid	89
9.3 Qualité des produits	92
<b>10 • Aciers d'emboutissage</b>	<b>97</b>
10.1 Les aciers standard pour emboutissage	98
10.2 Les aciers pour émaillage	98
10.3 Les aciers à haute formabilité	99

<b>11 • Les aciers à hautes caractéristiques</b>	<b>102</b>
11.1 Les aciers à dispersoïdes	102
11.2 Les aciers rephosphorés	103
11.3 Les aciers IFHR	103
11.4 Les aciers à Bake Hardening	104
11.5 Les aciers isotropes	106
11.6 Les aciers renitrurés	106
<b>12 • Les aciers à très haute résistance</b>	<b>109</b>
12.1 Les aciers double phase	109
12.2 Les aciers phase complexe	110
12.3 Les aciers ferrite-bainite	110
12.4 Les aciers martensitiques	111
12.5 Les aciers TRIP	111
12.6 Les aciers trempant	112
<b>13 • Revêtements des tôles d'acier</b>	<b>115</b>
13.1 Galvanisation	115
13.2 Electrodeposition de zinc	118
13.3 Dépôts à base d'aluminium	120
13.4 Dépôts d'étain et de chrome	121
13.5 Revêtements complémentaires	122
13.6 Conclusion générale sur les revêtements	123
<b>14 • Normalisation européenne des aciers</b>	<b>124</b>
14.1 Généralités sur la normalisation	124
14.2 Dénomination des aciers	125
14.3 Comment s'y retrouver ?	127
14.4 Les différentes catégories d'aciers au carbone	128
14.5 Les tôles à chaud	131
14.6 Les tôles à froid	136
14.7 Les tôles revêtues d'origine non définie	144
14.8 Fer blanc et fer chromé	146
14.9 Tôles prépeintes et prélaquées	148
<b>15 • Aciers inoxydables</b>	<b>151</b>
15.1 Les différents types	152
15.2 Aciers inoxydables ferritiques	153
15.3 Aciers inoxydables austénitiques	157
15.4 Aciers inoxydables austéno-ferritiques	162

<b>16 • Tôles composites</b>	<b>163</b>
16.1 Les flans soudés	163
16.2 Les flans patchwork	167
16.3 Les tôles sandwich à fonction acoustique	167

## C

### Le contact tôle-outil

<b>17 • La rugosité des tôles</b>	<b>175</b>
17.1 Nécessité d'une rugosité superficielle	175
17.2 Les principaux critères de rugosité	176
17.3 Les différentes textures possibles	179
<b>18 • Les principales lois du frottement</b>	<b>184</b>
18.1 Le coefficient de frottement de Coulomb	184
18.2 Le coefficient de frottement de Tresca	187
<b>19 • Mécanismes du frottement</b>	<b>189</b>
19.1 Le mécanisme au niveau microscopique	189
<b>20 • La lubrification</b>	<b>196</b>
20.1 Les différents régimes de lubrification	196
20.2 La courbe de Stribeck	197
20.3 Les différents régimes dans un outil	200
20.4 Les vitesses et pressions mises en jeu	202
20.5 Influence de la rugosité de l'outil	204
20.6 Influence de la rugosité de la tôle	206
20.7 Influence de la chimie de surface	209
<b>21 • Les lubrifiants</b>	<b>211</b>
21.1 Les lubrifiants solides	211
21.2 Les lubrifiants d'emboutissage	212
21.3 Les huiles évanescentes	213
21.4 Les huiles de protection	214
21.5 Les huiles solubles	216
21.6 Qu'est-ce qu'un pré lub ?	216
21.7 Les films secs	217
21.8 Les films pelables	218

21.9	Post-traitements	218
21.10	Comparaison des performances	219
21.11	Importance de la chimie de surface	220
<b>22</b>	<b>• Les anomalies de frottement</b>	<b>223</b>
22.1	Problèmes liés à la lubrification	223
<b>23</b>	<b>• Endommagement de la surface des tôles</b>	<b>226</b>
23.1	Le grippage	226
23.2	Poudrage et écaillage	229
23.3	Les picots	229
<b>24</b>	<b>• Conclusions sur le contact tôle-outil</b>	<b>231</b>

## D

### Limites de ductilité

<b>25</b>	<b>• Principaux modes</b>	<b>235</b>
25.1	Conventions de mesure	235
25.2	L'expansion	236
25.3	Le rétreint	237
25.4	La traction plane	238
25.5	Compression-compression	239
25.6	Diagramme de formage	239
25.7	Limite entre expansion et rétreint	243
<b>26</b>	<b>• Les courbes limite de formage</b>	<b>244</b>
26.1	Striction diffuse, localisée ou rupture ?	245
26.2	Concept industriel	246
26.3	Influence des matériaux	248
<b>27</b>	<b>• Établissement des CLF</b>	<b>250</b>
27.1	Les moyens de déformation	250
27.2	Les grilles ou trames	254
27.3	Mesure des déformations	256
27.4	Détermination de la striction localisée	257

<b>28 • Paramètres influents</b>	<b>264</b>
28.1 La taille de la grille	264
28.2 L'épaisseur de la tôle	264
28.3 La consolidation	265
28.4 Les trajectoires	266
28.5 La courbure	268
28.6 Le frottement	274
<b>29 • Limitations à l'usage des CLF</b>	<b>275</b>
29.1 Palier de limite d'élasticité	275
29.2 Les bords découpés	275
29.3 Influence de la répartition des déformations	276
29.4 Variabilité des résultats	278
<b>30 • La modélisation des CLF</b>	<b>279</b>
30.1 Le modèle américain	279
30.2 Le modèle de Cayssials	281
30.3 Le modèle Marciniak-Kuczinski	281
30.4 Le calcul par éléments finis	282
<b>31 • Les critères de plasticité</b>	<b>283</b>
31.1 Surface de charge ou de plasticité	285
31.2 Critères de Tresca et de Von Mises	286
31.3 Cas d'un métal anisotrope : critère de Hill	287
31.4 Autres formes du critère	288
31.5 Écrouissage isotrope, écrouissage cinématique	288
31.6 Établissement des critères de plasticité	290

## E

### Mécanique de l'emboutissage

<b>32 • Le pliage</b>	<b>293</b>
32.1 Pliage sans tension	293
32.2 Pliage avec tension	295
32.3 Courbure réelle	297

32.4	Cas des très petits rayons	298
32.5	Contrainte de pliage et de dépliage	298
32.6	Effet anticlastique	299
32.7	Influence de l'effet Bauschinger	300
32.8	Influence de la sensibilité à la vitesse	300
<b>33</b>	<b>• Principaux types d'emboutissage</b>	<b>302</b>
33.1	Emboutissage en expansion	302
33.2	Emboutissage en traction plane	305
33.3	Emboutissage en rétreint	306
33.4	Cisaillement	313
33.5	Mode dominant	314
33.6	Déformation des rives	316
<b>34</b>	<b>• Les forces développées en emboutissage</b>	<b>318</b>
34.1	Cas du godet	318
34.2	Cas d'une pièce de forme quelconque	324
<b>35</b>	<b>• Variables influentes</b>	<b>326</b>
35.1	Influence du frottement	326
35.2	Influence de l'épaisseur	328
35.3	Influence de la limite d'élasticité	329
35.4	Influence de la résistance	330
35.5	Influence de la consolidation	330
35.6	Influence de la vitesse	331
35.7	Influence de l'anisotropie	333

## F

### Limitations du procédé

<b>36</b>	<b>• Le plissement</b>	<b>339</b>
36.1	Plissement de collerette	339
36.2	Le plissement de brin libre	343
36.3	Le plissement de brin semi-libre	345
36.4	Facteurs influents	345
36.5	Effacement des plis	347

<b>37 • Striction et rupture</b>	<b>348</b>
37.1 Augmentation de rugosité	348
37.2 Rupture ductile : striction diffuse et localisée	349
37.3 Rupture en sifflet	350
37.4 Rupture fragile	351
37.5 Rupture différée	352
<b>38 • Le retour élastique</b>	<b>353</b>
38.1 Origine du retour élastique	354
38.2 Retour élastique des pièces élançées	356
38.3 Tension de panneau	358
38.4 La sur-courbure	361
38.5 Cloquage	362
<b>39 • Le voilage</b>	<b>364</b>
<b>40 • Les défauts de surface</b>	<b>368</b>
40.1 Les rayures	368
40.2 Peau d'orange	368
40.3 La vermiculure	369
<b>41 • Les essais d'emboutissage</b>	<b>371</b>
41.1 Essais fondamentaux	371
41.2 Essais simulatifs	374

## **G**

---

### Technique de l'emboutissage

<b>42 • Le découpage des flans</b>	<b>383</b>
42.1 Généralités sur le cisailage	383
42.2 Le découpage des flans	385
<b>43 • Notion de gamme</b>	<b>388</b>
43.1 Réemboutissage direct	388
43.2 Réemboutissage par retournement	389
43.3 Détourage	390
43.4 Notion de préforme	391

<b>44 • Opérations connexes</b>	<b>393</b>
44.1 Contre-emboutissage	393
44.2 Tombage de bord	393
44.3 Expansion de trou	395
44.4 Relevage de collet	397
44.5 Frappe	398
44.6 Tassage	398
44.7 Repassage ou étirage	399
44.8 Sertissage	401

## H

---

### Les presses et les outils

<b>45 • Les presses d'emboutissage</b>	<b>405</b>
45.1 Capacité des presses	405
45.2 Le nombre d'effets	406
45.3 Le mode d'entraînement	410
45.4 Bâtis des presses	413
<b>46 • Autres presses</b>	<b>416</b>
46.1 Lignes de presses	416
46.2 Presses transfert (ou à postes multiples)	417
46.3 Presses transférisées	417
46.4 Presses spéciales	418
<b>47 • Les outils</b>	<b>419</b>
47.1 Matrice	419
47.2 Poinçon	421
47.3 Serre-flan	422
<b>48 • Accessoires des outils</b>	<b>424</b>
48.1 Joncs et redans	425
48.2 Boudins de protection	427
48.3 Poinçons de contre-emboutissage	429
48.4 Lames de crevage	429

48.5	Cames	430
48.6	Presseurs	432
48.7	Drageoirs	432
48.8	Éjecteurs	433
<b>49</b>	<b>• Les différents types d'outils</b>	<b>434</b>
49.1	Formage sur butées	434
49.2	Réemboutissage direct	435
49.3	Réemboutissage par retournement	436
49.4	Calibrage, « tassage »	437
49.5	Stretch Draw	437
49.6	Outils à suivre	438
49.7	Étirage-repassage	439
49.8	Outils de détournage	440
49.9	Formage hydromécanique	440
49.10	Gamme classique automobile	441
<b>50</b>	<b>• Réalisation des outils</b>	<b>443</b>
50.1	Conception d'une gamme d'emboutissage	443
50.2	Règles de dimensionnement	445
50.3	Mise au point des outils	446
50.4	Aspect économique	447
<b>51</b>	<b>• Les matériaux d'outils</b>	<b>448</b>
51.1	Outils pour grandes séries	448
51.2	Outils pour prototypage	452
51.3	Surface des outils	453



---

## Le calcul en emboutissage

<b>52</b>	<b>• Pourquoi le calcul numérique ?</b>	<b>459</b>
52.1	Quelques définitions	460
52.2	Les éléments finis	462
52.3	Le maillage	463
52.4	Les différents types d'éléments	464
52.5	La gestion du contact	466

<b>53 • Les stratégies de calcul</b>	<b>467</b>
53.1 La méthode inverse	467
53.2 La méthode implicite incrémentale à larges steps	468
53.3 La méthode dynamique explicite	469
53.4 La méthode statique implicite	470
53.5 Intégration dans un code de CAO	470
53.6 Intérêt d'une géométrie paramétrée	471
<b>54 • Comment choisir la méthode ?</b>	<b>472</b>
54.1 Méthode inverse	472
54.2 Méthode à larges steps	473
54.3 Méthode dynamique explicite	474
54.4 Méthode statique implicite	475
<b>55 • Les précautions nécessaires</b>	<b>476</b>
55.1 Taille des éléments	476
55.2 Représentation du matériau	479
55.3 Critères de plasticité	480
55.4 Gestion du contact	481
55.5 Cas des très petits rayons	483
55.6 Problèmes de rives	483
55.7 Prise en compte des gradients	484
<b>56 • Conclusions</b>	<b>485</b>

## J

---

### Exemples

<b>57 • Utilisation des diagrammes de formage</b>	<b>491</b>
Exemple 1 – Distribution des déformations dans des cas simples	491
Exemple 2 – Cas d'un carter rectangulaire	493
Exemple 3 – Influence de la courbure	494
Exemple 4 – Limitation de la mise au point par mesure des déformations	495
Exemple 5 – Grandes déformations en cisaillement	495
Exemple 6 – Détection d'incidents techniques grâce aux mesures de déformation	496

<b>58 • Les ruptures</b>	<b>498</b>
Exemple 7 – Casses dues au métal ou au procédé ?	498
Exemple 8 – Casses dues à un grain grossier	499
Exemple 9 – Casses sur vermiculure	499
Exemple 10 – Rupture due au processus d'emboutissage	501
Exemple 11 – Casses en Vé sur boîte rectangulaire	502
Exemple 12 – Ruptures à l'expansion de trou	504
Exemple 13 – Influence du mode de découpe	504
Exemple 14 – Rupture fragile	505
Exemple 15 – Orientation du flan	507
<b>59 • Influence du frottement</b>	<b>508</b>
Exemple 16 – Ruptures de tôles pré-phosphatées	508
Exemple 17 – Emboutissage d'une vasque triangulaire	508
Exemple 18 – Ruptures dans les angles de portes des côtés de caisse	510
<b>60 • Défauts superficiels</b>	<b>514</b>
Exemple 19 – Vermiculure	514
Exemple 20 – Exfoliations	514
Exemple 21 – Défauts sur godets cylindriques	515
Exemple 22 – Empreintes sur godets	516
Exemple 23 – Usure de l'outil par pollution extérieure	517
<b>61 • Défauts géométriques</b>	<b>518</b>
Exemple 24 – Plissement sur pièce conique	518
Exemple 25 – Problème de tension des panneaux plans	519
Exemple 26 – Utilisation rationnelle des possibilités d'une presse	520
Exemple 27 – Voilage des panneaux plans	521
Exemple 28 – Voilage : influence de l'ordre des opérations	523
Exemple 29 – Vrillage des pièces élancées	524
<b>Bibliographie</b>	<b>527</b>
<b>Lexiques</b>	<b>535</b>
Français-Anglais	535
Anglais-Français	538
<b>Index</b>	<b>541</b>