

# Sommaire

<b>Avertissement</b> .....	1
<b>Remerciements</b> .....	3
<b>Introduction</b> .....	5

---

## **Section I. Vocabulaires métallurgiques** .....

<b>CHAPITRE 1 : Éléments de langage anciens et modernes</b> .....	17
<b>1.1. Langages anciens et modernes décrivant les produits ferreux</b> ...	18
1.1.1. <i>Fer-Fonte et Acier – vocabulaire du diagramme Fe-C</i> .....	18
1.1.2. <i>Appellations anciennes</i> .....	20
1.1.3. <i>Les « pièges » de la description scientifique actuelle                   des alliages Fe-C</i> .....	21
<b>1.2. Pureté, purification, propreté</b> .....	22
<b>1.3. Scories et laitiers</b> .....	26
<i>Quelles parentés entre scories et laitiers ?</i> .....	26
<i>Les laitiers modernes</i> .....	27
<i>« Histoire » des laitiers-scories</i> .....	28
<b>1.4. Repérage des hautes températures avant le XX<sup>e</sup> siècle</b> .....	29
<b>CHAPITRE 2 : Signification du mot « fonte »</b> .....	33
<b>2.1. Fonte : signification actuelle</b> .....	33
<b>2.2. Fer de fonte et fonte de fer</b> .....	34
<b>2.3. La fonte de la mine ou du minerai</b> .....	35
<b>2.4. Fonte ou fusion ?</b> .....	37
<b>2.5. Fondage</b> .....	38
<b>2.6. Conclusions</b> .....	39

<b>CHAPITRE 3 : Contenus techniques des noms donnés à l'acier . . .</b>	<b>43</b>
<b>3.1. Exemples de propriétés incluses dans les mots désignant         « l'acier » . . . . .</b>	<b>43</b>
<b>3.2. En Inde, la question du wootz. . . . .</b>	<b>45</b>

## **Section II. Quatre millénaires de fers-fontes-aciers . . . . . 49**

<b>CHAPITRE 4 : Sur les origines du fer . . . . .</b>	<b>51</b>
<b>4.1. Histoires du fer et des « âges du fer » . . . . .</b>	<b>51</b>
4.1.1. <i>Chronologie habituelle . . . . .</i>	51
4.1.2. <i>Signification des « âges » du fer. . . . .</i>	52
4.1.3. <i>Origine de la notion des « âges » . . . . .</i>	52
<b>4.2. Histoires de l'invention du fer . . . . .</b>	<b>53</b>
<b>4.3. Compétition entre Cu et Fe . . . . .</b>	<b>54</b>
<b>4.4. Point de vue philosophico-politique . . . . .</b>	<b>56</b>

<b>CHAPITRE 5 : Production des fers et des aciers depuis quatre millénaires . . . . .</b>	<b>59</b>
<b>5.1. Différents chemins de production des alliages de fer . . . . .</b>	<b>61</b>
5.1.1. <i>Description générale . . . . .</i>	61
5.1.2. <i>Exigences techniques . . . . .</i>	61
5.1.3. <i>Point de vue thermochimique. . . . .</i>	62
<b>5.2. Réduction directe : fer forgé . . . . .</b>	<b>66</b>
5.2.1. <i>Procédé. . . . .</i>	66
5.2.2. <i>Évolution technique des fours . . . . .</i>	67
5.2.3. <i>Exemples de fers de réduction directe. . . . .</i>	67
5.2.4. <i>Résumé sur la pureté des fers forgés. . . . .</i>	69
<b>5.3. La fonte de fer . . . . .</b>	<b>70</b>
5.3.1. <i>Procédé de fabrication. . . . .</i>	70
5.3.2. <i>Résultats . . . . .</i>	70
5.3.3. <i>Le haut-fourneau et le coke, évolution technologique. . . . .</i>	70
5.3.4. <i>Intérêts du coke . . . . .</i>	72
5.3.5. <i>Résumé sur la pureté et la propreté de la fonte . . . . .</i>	72
<b>5.4. Acier . . . . .</b>	<b>72</b>
5.4.1. <i>Différents chemins de production jusqu'à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle . . . . .</i>	72
5.4.2. <i>Commentaires sur la purification de l'acier . . . . .</i>	73
<b>5.5. Évolutions techniques au XX<sup>e</sup> siècle . . . . .</b>	<b>76</b>
<b>5.6. Nouvelles directions pour la production des alliages de fer . . . . .</b>	<b>79</b>

5.6.1.	<i>Nouveaux procédés de réduction directe.</i>	79
5.6.2.	<i>Fer « ultra pur »</i>	79
<b>5.7.</b>	<b>Analyse chimique</b>	80
	<b>Conclusions</b>	81
	<b>Annexe 1. Fer de haute pureté</b>	84
	<b>Annexe 2. Évolution des moyens de mise en forme.</b>	88

<b>CHAPITRE 6 :</b>	<b>Places respectives des fers et de l'acier depuis la purification par le feu jusqu'au diagramme Fe-C</b>	93
<b>6.1.</b>	<b>L'acier considéré comme un fer purifié</b>	94
6.1.1.	<i>Grèce antique</i>	94
6.1.2.	<i>Sources arabes et perses.</i>	95
6.1.3.	<i>Sources européennes.</i>	96
<b>6.2.</b>	<b>Transition vers une nouvelle description de l'acier comme un fer, ...</b>	97
6.2.1.	<i>Soufres et sels</i>	97
6.2.2.	<i>Phlogistique</i>	98
6.2.3.	<i>Plombagine.</i>	99
<b>6.3.</b>	<b>Acier : fer pur plus carbone</b>	100
6.3.1.	<i>Carbone et oxygène.</i>	100
6.3.2.	<i>Classification des produits ferreux en fonction de leur teneur en carbone</i>	100
<b>6.4.</b>	<b>Conclusion partielle</b>	101
<b>6.5.</b>	<b>À propos de la purification par le feu</b>	103
6.5.1.	<i>Purification/pureté</i>	103
6.5.2.	<i>Place du minerai.</i>	103
6.5.3.	<i>Purification par le feu</i>	104
<b>6.6.</b>	<b>Remarques finales</b>	105

---

## Section III. Les premiers Fers de réduction directe..... 109

<b>CHAPITRE 7 :</b>	<b>Procédés de réduction directe</b>	111
---------------------	--------------------------------------	-----

<b>CHAPITRE 8 :</b>	<b>Observation de clous gaulois. Réflexions sur le travail des forgerons du 1<sup>er</sup> siècle avant notre ère</b>	119
---------------------	---	-----

<b>8.1.</b>	<b>Le site du Crêt-Chatelard</b>	119
8.1.1.	<i>Localisation</i>	119
8.1.2.	<i>Occupations et chronologie</i>	120

8.1.3.	<i>Le rempart</i> . . . . .	120
<b>8.2.</b>	<b>Étude de laboratoire des clous du Crêt-Chatelard</b> . . . . .	121
8.2.1.	<i>Objectifs</i> . . . . .	121
8.2.2.	<i>Préparation des échantillons</i> . . . . .	121
8.2.3.	<i>Analyse chimique globale</i> . . . . .	121
<b>8.3.</b>	<b>Résultats des observations micrographiques</b> . . . . .	122
8.3.1.	<i>Microstructure du métal</i> . . . . .	122
8.3.2.	<i>Analyse des inclusions</i> . . . . .	123
8.3.3.	<i>Commentaires</i> . . . . .	123
<b>8.4.</b>	<b>Reconstitution de l'opération de forgeage</b> . . . . .	124
<b>8.5.</b>	<b>Questions de société</b> . . . . .	125
<b>8.6.</b>	<b>Conclusions</b> . . . . .	127
	<b>Annexe 1. Calcul du nombre de clous dans le rempart</b> . . . . .	127
<b>CHAPITRE 9 :</b>	<b>Le Tataru et l'acier des sabres japonais</b> . . . . .	131
<b>9.1.</b>	<b>Historique du Tataru</b> . . . . .	135
9.1.1.	<i>Origine du Tataru actuel</i> . . . . .	135
9.1.2.	<i>Avant le Tataru</i> . . . . .	136
9.1.3.	<i>Comment s'est maintenu le Tataru ?</i> . . . . .	137
9.1.4.	<i>Disparition du Tataru [4, 7, 9, 13]</i> . . . . .	137
9.1.5.	<i>Mise en place de nouvelles techniques de production</i> <i>à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle</i> . . . . .	138
9.1.6.	<i>Restauration du Tataru</i> . . . . .	139
9.1.7.	<i>Que dit-on du Tataru aujourd'hui ?</i> . . . . .	139
<b>9.2.</b>	<b>Particularités techniques du Tataru</b> . . . . .	141
<b>9.3.</b>	<b>Les produits d'entrée</b> . . . . .	143
9.3.1.	<i>Minerai</i> . . . . .	143
9.3.2.	<i>Charbon de bois</i> . . . . .	146
9.3.3.	<i>Argile du four</i> . . . . .	146
<b>9.4.</b>	<b>Description du procédé</b> . . . . .	147
9.4.1.	<i>Opération</i> . . . . .	147
9.4.2.	<i>Moyens de pilotage</i> . . . . .	147
9.4.3.	<i>Sortie des produits</i> . . . . .	148
<b>9.5.</b>	<b>Bilan matières</b> . . . . .	149
9.5.1.	<i>Perte en fer et consommation de charbon de bois</i> . . . . .	149
9.5.2.	<i>Laitier</i> . . . . .	149
9.5.3.	<i>Analyse des gaz</i> . . . . .	150
<b>9.6.</b>	<b>Description du métal produit</b> . . . . .	151
9.6.1.	<i>Qualités</i> . . . . .	151
9.6.2.	<i>Hétérogénéité du métal</i> . . . . .	151
9.6.3.	<i>Pureté</i> . . . . .	152
9.6.4.	<i>Propreté inclusionnaire</i> . . . . .	153
9.6.5.	<i>Séparation des différentes qualités</i> . . . . .	154

9.6.6.	<i>Appellations diverses</i> . . . . .	154
9.6.7.	<i>Utilisations du métal</i> . . . . .	155
9.6.8.	<i>Rendement en fer.</i> . . . . .	155
9.6.9.	<i>Personnel</i> . . . . .	156
<b>9.7.</b>	<b>Discussion.</b> . . . . .	156
9.7.1.	<i>Comparaison avec les procédés anciens : forge catalane, fours gaulois et africains.</i> . . . . .	156
9.7.2.	<i>Interprétations données de la séparation entre la fonte et une austénite pure</i> . . . . .	157
<b>9.8.</b>	<b>Visite au Nittoho Tatara</b> . . . . .	159
	<b>Conclusions.</b> . . . . .	162
	<b>Annexe 1. Étude du texte de la Figure 4</b> . . . . .	163

<b>CHAPITRE 10 : Quelques descriptions des auteurs de l'Antiquité grecque et latine</b> . . . . .	167
Hésiode (VIII <sup>e</sup> siècle avant notre ère) [2]. . . . .	167
Hippocrate (V <sup>e</sup> -IV <sup>e</sup> siècle avant notre ère) . . . . .	168
Aristote (IV <sup>e</sup> siècle avant notre ère) . . . . .	168
Hérodote (V <sup>e</sup> siècle avant notre ère) . . . . .	169
Diodore de Sicile (grec du I <sup>er</sup> siècle avant notre ère) [6] . . . . .	169
Pline (I <sup>er</sup> siècle, mort au cours de l'éruption du Vésuve, en 79) [7] . . . . .	169
Annexe 1. Au sujet de la traduction d'Aristote. . . . .	172

---

## **Section IV. Histoires de fontes et d'affinage au bas foyer.** . . . . . 175

### **Partie 1. Fontes – Évolutions depuis la Chine ancienne.** . . . . . 177

<b>CHAPITRE 11 : Du « Fourneau à mine » au haut-fourneau moderne, la fonte de fer</b> . . . . .	179
11.1. <b>Évolutions techniques aux XVIII<sup>e</sup>-XIX<sup>e</sup> siècles</b> . . . . .	181
11.2. <b>Évolution du haut-fourneau au XX<sup>e</sup> siècle.</b> . . . . .	182
11.3. <b>Innovations technologiques majeures.</b> . . . . .	182
11.4. <b>Coulée de la fonte</b> . . . . .	184

<b>CHAPITRE 12 : Microstructures et emplois des fontes anciennes et modernes</b> .....	187
12.1. Solidification des fontes .....	188
12.2. Fontes classiques .....	189
12.3. Transition de structure entre fontes blanches et grises .....	190
12.4. Fontes d'affinage : pureté exigée .....	191
12.5. Fontes ductiles .....	193
12.6. Fontes alliées – fontes spéciales .....	193
12.7. Fontes malléables .....	194
12.8. Importances respectives des fontes de moulage .....	195
Annexe 1. Histoire des fontes malléables .....	195

## **Partie 2. XVIII<sup>e</sup> siècle – Les premières descriptions des fontes** .....

199

<b>CHAPITRE 13 : Descriptions de la production des fontes au XVIII<sup>e</sup> siècle</b> .....	203
13.1. Définitions .....	204
13.2. Conditions d'obtention des fontes blanches et grises au XVIII <sup>e</sup> siècle. ....	204
13.2.1. <i>Marche du fourneau et production de fontes blanches ou grises</i> . . .	205
13.2.2. <i>La question des fontes naturellement blanches</i> .....	208
13.2.3. <i>Synthèse des données du XVIII<sup>e</sup> siècle sur le fonctionnement du fourneau</i> .....	209
Conclusions. ....	211

<b>CHAPITRE 14 : Entre le phlogistique et la plombagine où situer la « fonte à l'oxygène » ?</b> .....	215
14.1. Description de la pureté des fontes à l'époque de Réaumur . . . .	216
14.1.1. <i>Pureté des fontes blanches et grises</i> .....	216
14.1.2. <i>Transformation de fonte grise en fonte blanche</i> . ....	217
14.1.3. <i>Pureté des fontes comparées à l'acier</i> .....	217
14.1.4. <i>Pureté de la fonte naturellement blanche</i> .....	218
14.1.5. <i>Pureté des fontes par rapport au rendement en fer</i> . ....	218
14.2. Les « parties hétérogènes » dans la fonte .....	219
14.2.1. <i>Observations des surfaces de rupture</i> .....	219
14.2.2. <i>Relation avec la fragilité de la fonte</i> .....	220
14.2.3. <i>Impuretés, matières terreuses et degré de réduction</i> . ....	220
14.2.4. <i>Discussion sur les parties hétérogènes</i> .....	222

<b>14.3. Phlogistique et plombagine</b> . . . . .	223
14.3.1. <i>L'expansion du phlogistique</i> . . . . .	223
14.3.2. <i>Introduction de la plombagine</i> . . . . .	224
<b>14.4. Les premières analyses chimiques de la fonte et du fer</b> . . . . .	225
14.4.1. <i>Dissolution du fer et de la fonte dans un acide</i> . . . . .	225
14.4.2. <i>L'oxygène dans la fonte (Lavoisier 1782)</i> . . . . .	225
14.4.3. <i>Le blocage théorique jusqu'au premier quart du XIX<sup>e</sup> siècle</i> . . . . .	226
<b>14.5. Clarification de la question :</b>	
<b>carbone et/ou oxygène ?</b> . . . . .	230
14.5.1. <i>Il n'y a pas d'oxygène dans la fonte</i> . . . . .	230
14.5.2. <i>La classification moderne fer/acier/fontes blanche et grise</i> . . . . .	231
<b>14.6. Les conservateurs irréductibles</b> . . . . .	232
<b>Conclusions</b> . . . . .	233
<b>Annexe 1. Analyse des fontes par dissolution dans un acide</b> . . . . .	234

## CHAPITRE 15 : L'affinage des fontes au bas foyer :

<b>les descriptions du XVIII<sup>e</sup> siècle</b> . . . . .	241
<b>15.1. Les buts de l'affinage</b> . . . . .	243
15.1.1. <i>Langage d'aujourd'hui</i> . . . . .	243
15.1.2. <i>Description de la « chaîne » d'affinage au XVIII<sup>e</sup> siècle</i> . . . . .	243
15.1.3. <i>Description de l'affinage en langage du XVIII<sup>e</sup> siècle</i> . . . . .	244
15.1.4. <i>Le mazéage</i> . . . . .	245
<b>15.2. Exemples de procédés d'affinage au bas foyer</b> . . . . .	246
15.2.1. <i>À propos de la multitude de variantes et appellations</i> . . . . .	246
15.2.2. <i>Affinage de type wallon</i> . . . . .	247
15.2.3. <i>Affinage rivois en acier</i> . . . . .	248
15.2.4. <i>« Das Braten » en Carinthie</i> . . . . .	248
15.2.5. <i>Procédé bohémien</i> . . . . .	249
<b>15.3. Conduite du foyer d'affinage</b> . . . . .	249
15.3.1. <i>Description du creuset et de la tuyère</i> . . . . .	249
15.3.2. <i>La fusion de la gueuse</i> . . . . .	250
15.3.3. <i>La conduite du feu</i> . . . . .	251
15.3.4. <i>La conduite du vent</i> . . . . .	251
15.3.5. <i>Maîtrise du processus</i> . . . . .	252
15.3.6. <i>Sortie de la loupe et cinglage</i> . . . . .	252
15.3.7. <i>Synthèse des différences entre l'affinage « pour fer ou pour acier »</i> . . . . .	253
<b>15.4. Description des propriétés des fontes d'affinage</b> . . . . .	256
15.4.1. <i>Aujourd'hui et au XVIII<sup>e</sup> siècle</i> . . . . .	256
15.4.2. <i>Fusibilité et fluidité des fontes</i> . . . . .	256
15.4.3. <i>Réactivité des fontes</i> . . . . .	258
<b>15.5. Les théories problématiques de l'affinage</b>	
<b>des « fontes à l'oxygène »</b> . . . . .	259
15.5.1. <i>Fontes blanches</i> . . . . .	260

15.5.2.	<i>Fontes grises</i> . . . . .	260
15.5.3.	<i>Analyse de la démarche des trois Académiciens.</i> . . . . .	261
15.5.4.	<i>Diffusion des théories « oxygénistes »</i> . . . . .	261
<b>Synthèse et conclusions</b> . . . . .		262

## CHAPITRE 16 : Propositions pour l'interprétation physico-chimique de l'affinage des fontes au bas foyer. . . . . 267

<b>Points à discuter – Résumé des points essentiels des chapitres précédents.</b> . . . . .		268
<b>16.1. Teneurs en carbone des fontes, aciers et fers au XVIII<sup>e</sup> siècle.</b> . . . . .		270
<b>16.2. Stabilité des oxydes et réactions d'affinage.</b> . . . . .		271
<b>16.3. Fusion des fontes au cours d'un chauffage rapide</b> . . . . .		273
16.3.1.	<i>Conditions hors d'équilibre</i> . . . . .	273
16.3.2.	<i>Évolution au chauffage de la fonte de composition Co (environ 4,1 % C)</i> . . . . .	273
16.3.3.	<i>Évolutions des microstructures au chauffage</i> . . . . .	274
16.3.4.	<i>Conséquences</i> . . . . .	275
<b>16.4. Simulations de l'affinage au bas foyer</b> . . . . .		275
16.4.1.	<i>Décarburation d'une fonte blanche ou « fonte facile à affiner »</i> . . . . .	275
16.4.2.	<i>Décarburation d'une fonte grise ou « fonte difficile à affiner »</i> . . . . .	278
<b>16.5. Quelles températures au bas foyer pour l'affinage en fer ou acier ?</b> . . . . .		281
<b>16.6. Conditions d'affinage en fer doux (bas carbone)</b> . . . . .		283
<b>16.7. Question des pertes en fer</b> . . . . .		284
16.7.1.	<i>Idee directrice</i> . . . . .	284
16.7.2.	<i>Composition du laitier</i> . . . . .	284
16.7.3.	<i>Pertes en fer théoriques</i> . . . . .	285
<b>16.8. Conclusions</b> . . . . .		286

---

## Section V. Histoires d'aciers . . . . . 289

### Partie 1. Développements des aciers depuis le XVIII<sup>e</sup> siècle . . . . . 291

#### CHAPITRE 17 : Principaux procédés d'élaboration de l'acier liquide ou solide. . . . . 293

17.1.	<b>Description générale des méthodes de production.</b> . . . . .	293
17.2.	<b>Bilan à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle</b> . . . . .	297



17.3. Tableau résumé .....	298
17.4. Les problèmes du soudage à la forge des aciers .....	299
<b>CHAPITRE 18 : Sur l'évolution des techniques d'affinage de la fonte depuis le XIX<sup>e</sup> siècle .....</b>	<b>301</b>
<b>18.1. Présentation générale de l'affinage de la fonte depuis le XIX<sup>e</sup> siècle .....</b>	<b>302</b>
18.1.1. Objectifs de l'affinage .....	302
18.1.2. Familles de procédés d'affinage .....	303
18.1.3. Résumé historique .....	305
18.1.4. Point de vue thermochimique .....	306
<b>18.2. Affinage de la fonte au bas foyer (foyer d'affinerie) .....</b>	<b>308</b>
18.2.1. Principe .....	309
18.2.2. Mise en œuvre .....	310
<b>18.3. Affinage de la fonte par puddlage .....</b>	<b>311</b>
18.3.1. Principe .....	312
18.3.2. Historique .....	312
18.3.3. Techniques d'affinage par puddlage .....	313
18.3.4. Réactions d'affinage de la fonte [1] .....	315
18.3.5. Témoignages .....	317
<b>18.4. Affinage au four Martin-Siemens .....</b>	<b>318</b>
18.4.1. Invention du procédé .....	318
18.4.2. Description de l'installation .....	319
18.4.3. Processus d'affinage .....	321
18.4.4. Vie du four Martin .....	323
<b>18.5. Conversion de la fonte .....</b>	<b>324</b>
18.5.1. Historique .....	324
18.5.2. Description des convertisseurs .....	325
18.5.3. Fonctionnement .....	327
18.5.4. Résumé des évolutions des convertisseurs depuis 1950 en France [3a] .....	331
18.5.5. Souvenir : Spiegel/Thomas .....	331
<b>18.6. Comparaisons entre méthodes d'affinage .....</b>	<b>332</b>
18.6.1. Comparaisons entre affinage au bas foyer, puddlage et four Martin .....	333
18.6.2. Comparaison entre le four Martin et les convertisseurs (Tab. 7) .....	335
18.6.3. Productivités comparées des procédés d'affinage .....	336
<b>18.7. Transferts en poche .....</b>	<b>336</b>
<b>Conclusions .....</b>	<b>337</b>

<b>CHAPITRE 19 : L'acier de cémentation (XVIII<sup>e</sup>-XIX<sup>e</sup> siècles) : Gay-Lussac et la barrière imperméable de la surface du solide – Le Play contre Réaumur . . . . .</b>	<b>341</b>
<b>19.1. Techniques de cémentation . . . . .</b>	<b>342</b>
19.1.1. <i>L'« acier de cémentation » et la cémentation superficielle . . . . .</i>	342
19.1.2. <i>L'acier de cémentation, contrôle de fabrication . . . . .</i>	343
19.1.3. <i>Procédés de fabrication de l'acier de cémentation. . . . .</i>	346
<b>19.2. Quelles interprétations du phénomène de carburation ? . . . . .</b>	<b>352</b>
<b>19.3. Les problèmes de la France selon Le Play. . . . .</b>	<b>356</b>
<b>19.4. Fin de l'acier de cémentation . . . . .</b>	<b>358</b>
<b>Conclusion . . . . .</b>	<b>358</b>
<b>Annexe 1. Sur la signification générale de « cémentation » et cémentite . . .</b>	<b>359</b>

<b>CHAPITRE 20 : Les qualités d'aciers selon les classifications anciennes et modernes . . . . .</b>	<b>363</b>
<b>20.1. Qualification de « acier » au XVIII<sup>e</sup> siècle . . . . .</b>	<b>363</b>
<b>20.2. Définition de « acier » au XIX<sup>e</sup> siècle . . . . .</b>	<b>364</b>
<b>20.3. État des lieux au début du XX<sup>e</sup> siècle . . . . .</b>	<b>365</b>
<b>20.4. Performances/qualité . . . . .</b>	<b>366</b>
20.4.1. <i>La définition de « acier » par rapport à « fer » . . . . .</i>	366
20.4.2. <i>Les critères de « performance/qualité » . . . . .</i>	366
<b>20.5. Repérage des aciers par rapport à des termes qualitatifs . . . . .</b>	<b>367</b>
<i>Aciers fins . . . . .</i>	367
<i>Aciers spéciaux . . . . .</i>	368
<i>Aciers alliés/aciers de qualité . . . . .</i>	368
<i>Aciers de base, acier doux. . . . .</i>	368
<i>Autres types d'appellations . . . . .</i>	369
<b>20.6. Normalisation. . . . .</b>	<b>369</b>

## **Partie 2. Aciers fondus en creuset . . . . . 373**

<b>CHAPITRE 21 : Aciers au creuset – quelles connaissances en Europe sur le « Damas » ou le « wootz » avant le XIX<sup>e</sup> siècle ? . . .</b>	<b>375</b>
<b>21.1. Définitions . . . . .</b>	<b>377</b>
<b>21.2. Premiers textes techniques en Europe sur l'acier « de Damas » . . .</b>	<b>380</b>
21.2.1. <i>Premiers écrits significatifs . . . . .</i>	380
21.2.2. <i>Deux écrits métallurgiques du XVI<sup>e</sup> siècle. . . . .</i>	383
21.2.3. <i>Conclusion partielle . . . . .</i>	384
<b>21.3. Littérature épique et chroniques des croisades. . . . .</b>	<b>384</b>
21.3.1. <i>Les deux siècles de Croisades (1095-1270) . . . . .</i>	384
21.3.2. <i>Dans la steppe russo-ukrainienne. . . . .</i>	388

<b>21.4. Pendant la présence des Sarrasins en Europe du Sud (VIII<sup>e</sup>-XV<sup>e</sup> siècles)</b> . . . . .	390
21.4.1. <i>Sur les armes carolingiennes</i> . . . . .	391
21.4.2. <i>Al-Andalus</i> . . . . .	392
21.4.3. <i>Conclusion partielle</i> . . . . .	394
<b>21.5. Discussion</b> . . . . .	394
21.5.1. <i>Question du transfert de savoir</i> . . . . .	394
21.5.2. <i>Intérêt de l'acier au creuset oriental</i> . . . . .	395
<b>21.6. Conclusions</b> . . . . .	400
<b>Annexe 1. Damas de cristallisation et Damas de corroyage</b> . . . . .	403
<b>Annexe 2. Exemple de recette d'acier au creuset, chez Al-Biruni (X<sup>e</sup> siècle)</b> . . . . .	404
<b>Annexe 3. Texte de J.B. Tavernier</b> . . . . .	404
<b>Annexe 4. Texte de J. Chardin</b> . . . . .	405
<b>Annexe 5. Ondanique/hinduwani</b> . . . . .	407
<b>CHAPITRE 22 : Description des outils et des procédés de fusion en creuset depuis le IX<sup>e</sup> jusqu'au XX<sup>e</sup> siècle</b> . . . . .	415
<b>Aspects historiques sur l'acier au creuset</b> . . . . .	415
<b>Description générale</b> . . . . .	416
<b>Plan</b> . . . . .	418
<b>22.1. Moyens techniques et mise en œuvre</b> . . . . .	418
22.1.1. <i>Creusets</i> . . . . .	418
22.1.2. <i>Fours de chauffage</i> . . . . .	420
22.1.3. <i>Nature des charges</i> . . . . .	424
<b>22.2. Maîtrise des procédés</b> . . . . .	430
22.2.1. <i>Ateliers et usines</i> . . . . .	430
22.2.2. <i>Conduite des procédés</i> . . . . .	432
22.2.3. <i>Images et descriptions « récentes »</i> . . . . .	436
<b>Conclusions</b> . . . . .	437
<b>Annexe 1. « Procédé Clouet »</b> . . . . .	438
<b>CHAPITRE 23 : Situation de l'acier au creuset au XIX<sup>e</sup> siècle par rapport aux autres procédés d'élaboration de l'acier</b> . . . . .	443
<b>23.1. Intérêts de l'acier au creuset</b> . . . . .	444
23.1.1. <i>Point de vue historique</i> . . . . .	444
23.1.2. <i>L'intérêt scientifique et industriel en Europe</i> . . . . .	444
23.1.3. <i>L'intérêt économique et stratégique</i> . . . . .	445
23.1.4. <i>L'intérêt politique</i> . . . . .	445
<b>23.2. Compétition entre techniques d'élaboration</b> . . . . .	446
23.2.1. <i>La capacité de production de l'aciérie au creuset</i> . . . . .	446
23.2.2. <i>Difficultés de l'acier au creuset</i> . . . . .	448

23.2.3.	<i>La question de l'énergie</i> . . . . .	448
23.2.4.	<i>Éléments du prix de revient</i> . . . . .	449
<b>23.3.</b>	<b>Utilisations des aciers au creuset</b> . . . . .	452
<b>23.4.</b>	<b>Histoire particulière de la région stéphanoise au XIX<sup>e</sup> siècle</b> . . . . .	452
<b>23.5.</b>	<b>Vie et mort de l'aciérie au creuset</b> . . . . .	454
<b>23.6.</b>	<b>Héritages de l'aciérie au creuset</b> . . . . .	457
	<b>Conclusions</b> . . . . .	457

## **Partie 3. Des « aciers d'alliage » du XIX<sup>e</sup> siècle aux aciers spéciaux du XX<sup>e</sup> siècle** . . . . . 461

### **CHAPITRE 24 : Naissance des aciers spéciaux et de la métallurgie scientifique<sup>1</sup>** . . . . . 463

<b>24.1.</b>	<b>Études au XIX<sup>e</sup> siècle</b> . . . . .	463
<b>24.2.</b>	<b>Réalisations industrielles</b> . . . . .	464
24.2.1.	<i>Avant 1880</i> . . . . .	464
24.2.2.	<i>À partir de 1880</i> . . . . .	465
<b>24.3.</b>	<b>Développements scientifiques</b> . . . . .	466
24.3.1.	<i>Aperçu historique</i> . . . . .	466
24.3.2.	<i>Développement des moyens de caractérisation</i> . . . . .	466
24.3.3.	<i>Collaborations internationales et normalisation</i> . . . . .	468
<b>24.4.</b>	<b>Développements et recherche industrielle</b> . . . . .	469
24.4.1.	<i>Exemples de problèmes qui ont marqué la recherche de performances des aciers</i> . . . . .	469
24.4.2.	<i>Structure de la recherche avant le XX<sup>e</sup> siècle</i> . . . . .	470
24.4.3.	<i>Laboratoires de recherche dans l'industrie métallurgique</i> . . . . .	471

### **CHAPITRE 25 : Mines d'acier, *magnesia nigra* le manganèse dans les aciers depuis quand ?** . . . . . 475

<b>25.1.</b>	<b>Pourquoi le manganèse ?</b> . . . . .	476
25.1.1.	<i>Intérêts du Mn</i> . . . . .	476
25.1.2.	<i>Rappels métallurgiques</i> . . . . .	476
25.1.3.	<i>Rappels historiques : débuts de Mn dans l'élaboration des aciers</i> . . . . .	477
25.1.4.	<i>Mn dans les fontes</i> . . . . .	477
<b>25.2.</b>	<b>Mines d'acier et affinage des fontes</b> . . . . .	478
25.2.1.	<i>Les mines d'acier</i> . . . . .	478
25.2.2.	<i>L'affinage des fontes</i> . . . . .	479
	<i>Conclusion partielle</i> . . . . .	480
<b>25.3.</b>	<b>Le manganèse dans les procédés de réduction directe</b> . . . . .	481
25.3.1.	<i>Questions posées</i> . . . . .	481

25.3.2.	<i>Sur la réduction des minerais de fer manganésifères ou mines d'acier</i> . . . . .	481
25.3.3.	<i>Forge catalane.</i> . . . . .	483
25.3.4.	<i>Stückofen et fours à cuve.</i> . . . . .	485
25.3.5.	<i>Le Tataara, un acier de réduction directe sans intervention du manganèse (Ch. 9)</i> . . . . .	486
25.3.6.	<i>Conclusion partielle.</i> . . . . .	487
<b>25.4.</b>	<b>Depuis quand la magnesia/manganèse ?</b> . . . . .	488
25.4.1.	<i>Foyers anciens : acier / fers aciéreux / fer doux.</i> . . . . .	488
25.4.2.	<i>Magnesia et Le/La Manganèse.</i> . . . . .	490
25.4.3.	<i>Manganèse en Inde et en Chine.</i> . . . . .	492
25.4.4.	<i>Sparte</i> . . . . .	493
25.4.5.	<i>Conclusion partielle.</i> . . . . .	494
	<b>Conclusions générales.</b> . . . . .	495
	<b>Annexe 1. Fontes Spiegel et ferro-manganèses</b> . . . . .	497
	<b>Annexe 2. Réduction des minerais de fer manganésifères.</b> . . . . .	499

## CHAPITRE 26 : Moyens modernes d'élaboration

	<b>des aciers spéciaux</b> . . . . .	505
<b>26.1.</b>	<b>Le four électrique à arc et la production de masse des aciers spéciaux</b> . . . . .	505
26.1.1.	<i>Principe</i> . . . . .	506
26.1.2.	<i>Histoire</i> . . . . .	507
26.1.3.	<i>Évolutions techniques.</i> . . . . .	508
26.1.4.	<i>Matières premières de l'aciérie électrique.</i> . . . . .	509
26.1.5.	<i>Le four et son environnement</i> . . . . .	509
26.1.6.	<i>Réactions métallurgiques au four à arc.</i> . . . . .	510
26.1.7.	<i>Conduite d'une opération de fusion-affinage</i> . . . . .	511
26.1.8.	<i>La filière électrique moderne</i> . . . . .	511
	<i>Conclusion partielle</i> . . . . .	512
<b>26.2.</b>	<b>Métallurgie secondaire et techniques de refusion</b> . . . . .	513
26.2.1.	<i>Fonctions assurées par la métallurgie secondaire.</i> . . . . .	513
26.2.2.	<i>Réacteurs de la métallurgie secondaire</i> . . . . .	517
	<i>Conclusion partielle</i> . . . . .	520
<b>26.3.</b>	<b>Élaboration des aciers inoxydables</b> . . . . .	521
26.3.1.	<i>Définitions</i> . . . . .	521
26.3.2.	<i>Familles d'aciers inoxydables [14, 15]</i> . . . . .	522
26.3.3.	<i>Problèmes d'élaboration [12].</i> . . . . .	523
26.3.4.	<i>Procédés spéciaux de décarburation</i> . . . . .	524
26.3.5.	<i>Gamme d'affinage des aciers inoxydables.</i> . . . . .	525
26.3.6.	<i>Développement des aciers inoxydables</i> . . . . .	526
26.3.7.	<i>Historique des aciers inoxydables</i> . . . . .	526
	<b>Remarques finales</b> . . . . .	528

<b>CHAPITRE 27 : Participation de l'industrie stéphanoise au développement des aciers spéciaux</b> . . . . .	531
<b>27.1. Historique</b> . . . . .	531
<b>27.2. Commentaires</b> . . . . .	538
<b>Conclusions</b> . . . . .	539
<b>CHAPITRE 28 : Solidification des aciers Coulée et soudage</b> . . . . .	543
<b>28.1. Différents types de coulée</b> . . . . .	544
28.1.1. <i>Fonte d'affinage</i> . . . . .	544
28.1.2. <i>Moulage d'aciers</i> . . . . .	544
28.1.3. <i>Coulée des aciers au creuset (quelques centaines de kg)</i> . . . . .	544
28.1.4. <i>Coulée de plusieurs dizaines de tonnes</i> . . . . .	544
28.1.5. <i>Coulée en lingotière (Fig. 1 et 2)</i> . . . . .	545
28.1.6. <i>Coulée continue</i> . . . . .	545
<b>28.2. Problèmes à la solidification</b> . . . . .	546
28.2.1. <i>Contraction à la solidification : retassures</i> . . . . .	546
28.2.2. <i>Interface liquide/solide : macroségrégations</i> . . . . .	547
28.2.3. <i>Microstructures et microségrégations</i> . . . . .	548
<b>28.3. La coulée continue</b> . . . . .	549
<b>28.4. Soudage par fusion du métal</b> . . . . .	551

---

## Section VI. Les acteurs des métiers du fer . . . . . 555

<b>CHAPITRE 29 : Les acteurs des métiers du fer avant le XIX<sup>e</sup> siècle</b> . . . . .	557
<b>29.1. Entre archéologie récente et histoire ancienne</b> . . . . .	557
29.1.1. <i>Forgerons et agriculteurs-métallurgistes</i> . . . . .	557
29.1.2. <i>Implantations</i> . . . . .	559
29.1.3. <i>Points de vue mythiques</i> . . . . .	559
<b>29.2. En France, de la Renaissance jusqu'au début du XIX<sup>e</sup> siècle</b> . . . . .	560
29.2.1. <i>Les abbayes et les nobles</i> . . . . .	560
29.2.2. <i>L'État</i> . . . . .	561
29.2.3. <i>Maîtres de forge</i> . . . . .	562
29.2.4. <i>Ouvriers</i> . . . . .	563
29.2.5. <i>Maîtres de forge et innovation</i> . . . . .	565
29.2.6. <i>Enseignement/apprentissage (XVIII<sup>e</sup>-XIX<sup>e</sup> siècles)</i> . . . . .	568

<b>CHAPITRE 30 : Mutations techniques et sociales de la sidérurgie en France au XIX<sup>e</sup> siècle</b> . . . . .	571
<b>30.1. Évolutions techniques.</b> . . . . .	571
30.1.1. <i>Affinage de la fonte en fer et acier.</i> . . . . .	571
30.1.2. <i>Transition entre fonte au bois et fonte au coke</i> . . . . .	573
<b>30.2. Problèmes et freins au développement.</b> . . . . .	577
<b>30.3. Évolutions des structures industrielles</b> . . . . .	578
30.3.1. <i>Évolution des acteurs de la production</i> . . . . .	578
30.3.2. <i>Évolutions géographiques</i> . . . . .	579
30.3.3. <i>Concentrations, rapprochements</i> . . . . .	579
30.3.4. <i>Conséquences sociales.</i> . . . . .	579
<b>30.4. Évolutions scientifiques</b> . . . . .	580
<b>Conclusion</b> . . . . .	580
<b>Annexe 1. Meeting du Comité des Forges de Champagne en 1869 à Saint-Dizier</b> . . . . .	582
<b>CHAPITRE 31 : Les crises de la sidérurgie depuis le XX<sup>e</sup> siècle</b> . . . . .	585
<b>31.1. Avant la deuxième guerre mondiale</b> . . . . .	586
31.1.1. <i>Évolutions techniques.</i> . . . . .	586
31.1.2. <i>Organisation de la sidérurgie française.</i> . . . . .	587
31.1.3. <i>Historique</i> . . . . .	589
<b>31.2. Évolutions depuis la seconde guerre mondiale</b> . . . . .	590
31.2.1. <i>Restructurations après la guerre : 1945-1954</i> . . . . .	591
31.2.2. <i>« Rapiécages » et immobilisme : 1954-1966</i> . . . . .	592
31.2.3. <i>De la convention État-sidérurgie (1966) à la crise de 1974</i> . . . . .	593
31.2.4. <i>La fin des Trente Glorieuses – 1974.</i> . . . . .	594
31.2.5. <i>Contrôle de l'État et nationalisation (1978-1982)</i> . . . . .	595
31.2.6. <i>Épilogue politique : privatisation.</i> . . . . .	596
<b>31.3. Questions sociales</b> . . . . .	597
31.3.1. <i>Origines des ouvriers</i> . . . . .	597
31.3.2. <i>Conséquences des restructurations</i> . . . . .	597
<b>Conclusions</b> . . . . .	598
<b>Annexe 1. La sidérurgie au début du XXI<sup>e</sup> siècle</b> . . . . .	599
<b>CHAPITRE 32 : Sur la recherche métallurgique en France depuis 1945</b> . . . . .	603
<b>32.1. Recherche industrielle sidérurgique en France.</b> . . . . .	603
32.1.1. <i>R&amp;D sidérurgique.</i> . . . . .	603
32.1.2. <i>Depuis 1945 – recherche sidérurgique.</i> . . . . .	604

<b>32.2. Recherche publique en métallurgie</b> .....	606
32.2.1. <i>Débuts des laboratoires</i> .....	606
32.2.2. <i>Depuis 1945 en France – recherche publique</i> .....	607
<b>Conclusions</b> .....	610
<b>Remarques finales</b> .....	613
<b>Lexique</b> .....	619
<b>Index</b> .....	633