

Table des matières

Introduction	1
Michel CATHELINÉAU et Alexandre CHAGNES	
Chapitre 1. La prévention des déchets	9
Eddy LANGLOIS	
1.1. Introduction.	9
1.2. Le constat	10
1.2.1. L’empreinte écologique de l’activité de l’homme	10
1.2.2. Notre part de déchets	12
1.2.3. Le devenir de nos déchets	14
1.3. Les solutions	17
1.3.1. La priorité : réduire les 14 tonnes de déchets invisibles	18
1.3.2. La réduction de la part visible des déchets	20
1.3.3. En route vers la sobriété	23
1.4. Bibliographie.	23
Chapitre 2. Ressources primaires et secondaires pour les transitions énergétiques et digitales	25
Michel CATHELINÉAU	
2.1. Les grands booms industriels liés au type d’énergie et les changements consécutifs dans l’utilisation des ressources	25
2.1.1. Petit rappel d’histoire. Les sources d’énergie et l’exploitation des ressources naturelles au cours des siècles : soleil et photosynthèse – la production primaire essentielle à l’activité sur Terre	25

2.1.2. Les premières prises de conscience de la dimension finie des ressources minérales et énergétiques	26
2.2. Les métaux employés par l'industrie : métaux rares, stratégiques, critiques, terres rares, etc.	31
2.2.1. Métaux de base (majeurs)	31
2.2.2. Métaux précieux.	31
2.2.3. Éléments ou matériaux critiques	31
2.2.4. Petits métaux ou métaux rares (mineurs)	32
2.2.5. Métaux stratégiques	32
2.3. Notion de réserves et ressources disponibles : les réserves en métaux	33
2.4. Les métaux des transitions énergétiques et numériques	35
2.4.1. Transition énergétique	35
2.4.2. Les métaux pour la transition numérique et digitale.	37
2.4.3. Les causes d'une consommation galopante de métaux	38
2.5. Un futur incertain : la part relative des ressources primaires et secondaires	40
2.5.1. Prédiction des besoins actuels et futurs : la part des ressources secondaires produites par le recyclage	40
2.5.2. Tensions sur l'approvisionnement à court terme.	42
2.5.3. Raréfaction annoncée des ressources	43
2.5.4. Mode de renouvellement des réserves	44
2.6. Le recyclage des métaux	47
2.6.1. Ressources secondaires grâce au recyclage.	47
2.6.2. Part future du recyclage dans la ressource globale en métaux	49
2.7. Bibliographie	49

Chapitre 3. Recyclage et *business model(s)* dans un contexte d'économie circulaire. 53

Sébastien LIARTE

3.1. Le rôle du recyclage dans le passage de l'économie linéaire à l'économie circulaire	54
3.1.1. L'économie circulaire	54
3.1.2. Le recyclage pour « boucler la boucle ».	56
3.2. Inciter les entreprises à « boucler la boucle » à travers le recyclage	57
3.2.1. Les incitations réglementaires mises en place par les pouvoirs publics	57
3.2.2. Les incitations financières mises en place par les pouvoirs publics	58

3.3. À la recherche d'un <i>business model</i> pour l'économie circulaire en général et pour le recyclage en particulier.	59
3.3.1. Qu'est-ce qu'un <i>business model</i> ?	59
3.3.2. Les <i>business models</i> de l'économie circulaire	60
3.3.3. Le recyclage comme élément central des <i>business models</i> de fermeture de la boucle	61
3.4. Le cas des batteries des véhicules électriques.	62
3.4.1. La deuxième vie des batteries, opportunités ou menaces pour les spécialistes du recyclage	63
3.4.2. Contraintes et incitations au recyclage des batteries.	63
3.4.3. <i>Scenarii</i> de <i>business models</i> pour les batteries d'occasion de véhicules électriques	63
3.5. Conclusion	65
3.6. Bibliographie.	66

Chapitre 4. Recyclage des matériaux de la transition énergétique par voie hydrométallurgique

Alexandre CHAGNES

4.1. Introduction.	69
4.2. Principales opérations unitaires des procédés hydrométallurgiques. . .	71
4.2.1. Lixiviation	71
4.2.2. Extraction, purification et séparation	74
4.2.3. Précipitation et cristallisation	78
4.3. Mise en œuvre de procédés hydrométallurgiques dans le cadre du recyclage	80
4.3.1. Recyclage des batteries lithium-ion	80
4.3.2. Recyclage des aimants permanents	87
4.4. Conclusion	91
4.5. Bibliographie.	92

Chapitre 5. Récupération et recyclage des métaux contenus dans les DEEE

Pauline GAMBS, Marie LEPAGE et Hervé MUHR

5.1. Introduction.	95
5.2. Définition et contexte de l'étude	96
5.2.1. Qu'est-ce qu'un DEEE ?	96
5.2.2. Les sept catégories de DEEE	97
5.2.3. Gisement/état de l'art.	99

5.3. Le devenir des (D)EEE	107
5.3.1. Collecte	107
5.3.2. Seconde vie	114
5.3.3. Recyclage et valorisation	115
5.4. Une mine urbaine	117
5.4.1. Composition des DEEE	117
5.4.2. Défis du recyclage	121
5.4.3. Limites du recyclage	122
5.4.4. Les différents acteurs du recyclage.	123
5.5. L'exemple du téléphone portable	123
5.5.1. Le gisement	123
5.5.2. La collecte et les acteurs	123
5.5.3. La composition des téléphones portables	124
5.5.4. Le recyclage, la seconde vie et la valorisation	127
5.5.5. Les limites et défis	130
5.6. Conclusion	130
5.7. Bibliographie.	131

Chapitre 6. Le recyclage des cartes électroniques 133

Benoît VILLEMEJEANNE et Sophie LEGEAI

6.1. Introduction.	133
6.2. Les cartes électroniques, une mine de métaux rares et précieux	134
6.2.1. Architecture et composition	134
6.2.2. Gisement potentiel	136
6.2.3. Pourquoi recycler les métaux contenus dans les cartes électroniques ?	138
6.3. Le traitement des cartes électroniques	141
6.3.1. Les procédés pyrométallurgiques.	143
6.3.2. Les procédés hydrométallurgiques	147
6.3.3. Les enjeux actuels du recyclage	149
6.3.4. Le recyclage des cartes électroniques en France.	152
6.4. Conclusion	153
6.5. Bibliographie.	154

Chapitre 7. Méthode de recyclage des polymères par fabrication additive *open source* 159

Fabio CRUZ SANCHEZ, Hakim BOUDAUD, Sandrine HOPPE
et Mauricio CAMARGO

7.1. Introduction.	160
7.2. Cadre théorique	160

7.2.1. La fabrication additive (FA) commerciale	160
7.2.2. Définition de la FA <i>open source</i>	162
7.2.3. Recyclage de polymères	164
7.3. Le recyclage dans la fabrication additive	166
7.4. Proposition d'une méthodologie pour évaluer le potentiel de recyclabilité des polymères pour la fabrication additive	169
7.4.1. Étape 1 : définition du matériau	171
7.4.2. Étape 2 : définition des procédés	171
7.4.3. Étape 3 : fabrication des échantillons	172
7.4.4. Étape 4 : évaluation.	172
7.4.5. Étape 5 : recyclage	173
7.5. Cas d'application : recyclage de l'acide polylactique (PLA) pour l'impression 3D de type FFF	173
7.5.1. Étape 1 : définition du matériau : l'acide polylactique (PLA) . . .	173
7.5.2. Étape 2 : définition des procédés	173
7.5.3. Étape 3 : fabrication des échantillons	175
7.5.4. Étape 4 : évaluation : propriétés mécaniques.	179
7.5.5. Étape 5 : recyclage	180
7.6. Résultats.	180
7.7. Conclusion	184
7.8. Bibliographie.	184

Chapitre 8. Cadre d'évaluation holistique du recyclage distribué par l'impression 3D *open source* 191

Pavlo SANTANDER TAPIA, Fabio CRUZ SANCHEZ, Hakim BOUDAUD
et Mauricio CAMARGO

8.1. Introduction.	192
8.2. État de l'art	194
8.3. Proposition méthodologique.	196
8.4. Développement et application des modèles au cas d'une plateforme universitaire, le LF2L.	199
8.4.1. Niveau opérationnel : développement et application du modèle d'optimisation.	199
8.4.2. Niveau de système : développement et application du modèle de dynamique de système	205
8.5. Conclusion	213
8.6. Bibliographie.	216

Chapitre 9. Recyclage en cascade du bois déchet 219
 Nicolas BROSE, Arnaud BESSERER, Sarah TROILO, Pierre GIRODS,
 Lucas SOUFFLET et Yann ROGAUME

9.1. Introduction 219
 9.2. État des lieux, gisements 221
 9.3. Le tri 225
 9.4. Industrie des panneaux, problème du MDF (méthodes actuelles) 227
 9.5. Recherches et innovations en cours. 228
 9.5.1. Le tri, méthodes avancées 228
 9.5.2. Épuration 231
 9.5.3. Les fibres de bois comme matière intermédiaire
 dans le recyclage des déchets bois 233
 9.5.4. Traitement des déchets dangereux (classe C). 235
 9.5.5. Méthodes avancées en microbiologie : la bioremédiation 237
 9.5.6. La microscopie pour décrypter les processus
 de bioremédiation. 239
 9.6. Conclusion 241
 9.7. Bibliographie 242

Chapitre 10. Recyclage et valorisation du matériau verre 245
 Christophe RAPIN, Eléonore DURAND et Marie-Alice SKAPER

10.1. Introduction 246
 10.2. Définition – généralités 247
 10.2.1. Le verre, un liquide ? 247
 10.2.2. Élaboration du verre et rôle du verre recyclé 248
 10.2.3. Les différents types de verres 249
 10.2.4. Quantités de verre produit 251
 10.3. Données générales sur le recyclage 253
 10.3.1. Cycle de vie du verre 254
 10.3.2. Taux de calcin introduit 257
 10.3.3. Les différents déchets. 257
 10.4. Les différentes causes de problèmes selon les sources des déchets 264
 10.4.1. Problèmes des céramiques dans le groisil 264
 10.4.2. Les inclusions métalliques 266
 10.4.3. Les matières organiques 268
 10.4.4. Cas du cristal au plomb. 268
 10.5. Conclusion 270
 10.6. Bibliographie 271

Chapitre 11. L'agromine, filière de valorisation des métaux contenus dans les sols 273

Marie-Odile SIMONNOT, Baptiste LAUBIE, Jean Louis MOREL
et Guillaume ECHEVARRIA

11.1. Introduction	273
11.2. Sols métallifères	276
11.2.1. Présence d'éléments-traces métalliques dans les sols	276
11.2.2. Conséquences de la présence d'ETM dans les sols	277
11.2.3. Techniques de dépollution – phytoremédiation.	278
11.3. Plantes hyperaccumulatrices	279
11.3.1. Définition	279
11.3.2. Culture de plantes hyperaccumulatrices	280
11.4. Procédés pour valoriser les métaux contenus dans la biomasse	281
11.4.1. Récupération du métal après traitement thermique	283
11.4.2. Récupération du métal directement à partir des plantes	284
11.5. Impacts environnementaux de la filière agromine	284
11.6. Conclusion	285
11.7. Bibliographie	286

Chapitre 12. Le recyclage des constituants du BTP et leurs filières de recyclage 289

Jean-Michel MECHLING, Cécile DILIBERTO, Sandrine BRAYMAND
et Essia BELHAJ

12.1. Introduction	289
12.1.1. Les enjeux de la déconstruction	289
12.1.2. Les matériaux du BTP	292
12.2. Quels matériaux de construction effectivement recyclables ? Quelles propriétés ?	293
12.2.1. Fraisats routiers et agrégats d'enrobés	294
12.2.2. Plâtre et chaux	295
12.2.3. Terre cuite	296
12.2.4. Bétons hydrauliques « ordinaires »	296
12.2.5. Nouveaux bétons hydrauliques (BFUP, bétons cellulaires, béton de chanvre, etc.)	297
12.3. Quels coproduits industriels recyclables pour la construction ?	298
12.3.1. Coproduit (« déchet » d'un produit industriel principal)	298
12.3.2. Déchets (fin de vie d'un produit industriel)	300
12.4. Valorisation dans les matériaux du génie civil	301

12.4.1. Dans les ciments Portland ou comme addition au béton	301
12.4.2. En reformant le liant d'origine, cas particulier du plâtre (voire de la chaux)	306
12.4.3. En tant que granulats à béton	307
12.4.4. Dans les routes	312
12.5. Conclusion : freins et leviers de ces voies de recyclage et valorisation	315
12.6. Bibliographie	316
Liste des auteurs	325
Index	329