

# Table des matières

<b>Introduction</b> . . . . .	1
<b>Partie 1. Crise de l'Anthropocène et transition écologique</b> . . . . .	7
<b>Introduction de la partie 1</b> . . . . .	9
<b>Chapitre 1. Émergence de l'Anthropocène : historique des effets écologiques de l'activité humaine et de sa technologie.</b> . . . . .	11
1.1. Aux commencements, l'humanité intégrée à la biosphère . . . . .	11
1.2. La première période d'activité humaine artificielle : du Néolithique à la révolution industrielle . . . . .	12
1.2.1. La révolution néolithique . . . . .	12
1.2.2. Cinq mille ans d'expansion lente de l'activité humaine . . . . .	14
1.3. La révolution industrielle du XVIII <sup>e</sup> siècle, début de l'Anthropocène . .	16
1.4. L'apogée de l'Anthropocène. . . . .	17
1.4.1. La deuxième révolution industrielle amplificatrice de la crise écologique . . . . .	17
1.4.1.1. Un développement généralisé de la combustion comme source d'énergie . . . . .	18
1.4.1.2. Limite d'un système extractif : la crise de l'énergie . . . . .	19
1.4.1.3. Développement massif de rejets, une société des déchets . .	19
1.4.1.4. Les effets destructeurs de l'agriculture intensive et la fracture métabolique . . . . .	21
1.4.2. L'apogée du système technologique contemporain et la crise écologique. . . . .	22

1.4.2.1. Une crise énergétique et une nouvelle révolution technologique . . . . .	22
1.4.2.2. Le changement d'échelle de l'activité et l'extension du monde technologique . . . . .	23
1.4.2.3. La crise écologique de l'Anthropocène . . . . .	24

**Chapitre 2. De la crise écologique de l'Anthropocène  
à la transition écologique . . . . . 27**

2.1. Structure et formes de la crise écologique . . . . .	27
2.1.1. Le réchauffement ou dérèglement climatique . . . . .	29
2.1.2. Du dérèglement du système atmosphérique à la crise du système hydrologique . . . . .	29
2.1.3. Dérèglements et dégradation du système écologique, provoquant notamment l'extinction d'espèces animales... . . . . .	29
2.2. Les facteurs anthropiques : rejets, extractions et dégradations . . . . .	32
2.2.1. L'émission de gaz à effet de serre . . . . .	32
2.2.2. « La contamination du monde » : les pollutions chimiques et biologiques . . . . .	35
2.2.3. La production de déchets . . . . .	37
2.2.4. L'épuisement des ressources . . . . .	38
2.2.5. La dégradation des espaces naturels et l'artificialisation des espaces. . . . .	42
2.3. Un processus marqué par une dimension d'urgence . . . . .	43
2.4. De la crise à la transition écologique, l'impératif de la mutation technologique . . . . .	44
2.4.1. Face à la crise écologique, la nécessaire prise en compte des nuisances écologiques des technologies mises en œuvre . . . . .	44
2.4.2. Nécessité de l'élimination des technologies aux effets destructeurs, « l'euthanasie des technologies » . . . . .	45
2.4.3. Générer des innovations technologiques incrémentales pour améliorer l'efficacité écologique de technologies traditionnelles non remplaçables . . . . .	46
2.4.4. Générer un courant de technologies nouvelles de rupture ou de résurgence compatibles avec l'environnement . . . . .	47
2.4.5. Niveau unitaire et impact global, nécessité d'une diversité de la réponse technologique. . . . .	47
2.4.6. Générer des technologies dédiées à réparer les dégâts engendrés par la crise écologique . . . . .	48
2.5. Note technique sur la modélisation de la limite écologique d'une technologie . . . . .	48

2.5.1. Limite écologique d'une activité . . . . .	49
2.5.2. De la mesure de contribution à l'indicateur unitaire de nuisance écologique : la filière technologique cadre pertinent . . . . .	50
<b>Partie 2. Des mutations technologiques en cours face à la crise écologique . . . . .</b>	<b>53</b>
<b>Introduction de la partie 2. . . . .</b>	<b>55</b>
<b>Chapitre 3. Les mutations technologiques pour la transition énergétique et les transports . . . . .</b>	<b>57</b>
3.1. Les scénarios de transition énergétique . . . . .	57
3.1.1. L'abandon programmé des technologies énergétiques thermiques à combustible fossile . . . . .	59
3.1.1.1. La tendance à l'élimination de la production électrique au charbon . . . . .	59
3.1.1.2. Les centrales au fioul : une quasi-disparition déjà entamée .	61
3.1.2. Deux modes de production d'électricité thermique conventionnels en recours . . . . .	62
3.1.2.1. Une exception énergétique et écologique : les centrales à gaz . . . . .	62
3.1.2.2. Un mode de production électrique controversé mais durable : le nucléaire . . . . .	62
3.1.3. Le recours aux énergies renouvelables . . . . .	64
3.1.3.1. L'énergie solaire . . . . .	65
3.1.4. L'énergie solaire de concentration . . . . .	66
3.1.4.1. L'énergie éolienne . . . . .	66
3.1.4.2. Le retour de l'hydraulique . . . . .	68
3.1.4.3. L'énergie géothermique . . . . .	71
3.1.4.4. Les nouveaux dispositifs pour pallier l'intermittence des énergies renouvelables . . . . .	72
3.2. Mutations écotechnologiques dans les transports . . . . .	72
3.2.1. Le transport routier . . . . .	73
3.2.1.1. La limite écologique du système de transport routier et automobile : l'émission de gaz à effet de serre . . . . .	73
3.2.1.2. Un facteur amplificateur : l'effet de masse, l'importance du parc automobile et sa croissance . . . . .	74

3.2.1.3. La réponse initiale : la mutation de la technologie de motorisation des transports routiers . . . . .	75
3.2.1.4. Une tendance de transformation technologique de deuxième ordre : la motorisation pile à combustible/hydrogène . . . . .	76
3.2.1.5. Un second niveau de réponse technologique : la reconfiguration du système technique automobile . . . . .	77
3.2.1.6. La fin du « tout-automobile » : la diversification des modes de transport . . . . .	78
3.2.2. Le transport aérien . . . . .	79
3.2.2.1. Les nuisances environnementales du transport aérien . . . . .	79
3.2.2.2. Les réponses technologiques pour réduire les émissions. . . . .	80
3.2.3. Le transport maritime . . . . .	83
3.2.3.1. L'impact environnemental du transport maritime. . . . .	83
3.2.3.2. Les réponses technologiques . . . . .	84
3.2.4. Le transport ferroviaire. . . . .	86

**Chapitre 4. Les réponses technologiques à la crise écologique dans les activités de transformation. . . . . 89**

4.1. L'extraction minière. . . . .	89
4.1.1. Pollutions et dégradations écologiques de l'industrie minière. . . . .	89
4.1.2. Les technologies correctives . . . . .	90
4.2. Les industries des matériaux et de la première transformation. . . . .	91
4.2.1. La sidérurgie. . . . .	92
4.2.2. Le ciment et les matériaux de construction . . . . .	92
4.3. L'industrie chimique . . . . .	93
4.3.1. L'industrie chimique et l'environnement . . . . .	93
4.3.2. Tendances de la mutation technologique vers la transition écologique de l'industrie chimique . . . . .	94
4.4. Crise écologique et réponses technologiques dans les industries de transformation . . . . .	97
4.4.1. L'industrie textile . . . . .	97
4.4.2. L'industrie du cuir . . . . .	98
4.4.3. L'industrie agroalimentaire . . . . .	99
4.4.4. L'emballage . . . . .	100
4.4.4.1. Un impact écologique important et croissant . . . . .	100
4.4.4.2. Des tendances de réponses dans la transition écologique . . . . .	101
4.5. L'industrie électronique et numérique . . . . .	102
4.5.1. Les technologies de l'information perçues comme immatérielles et réductrices de l'impact écologique des autres activités . . . . .	102

4.5.2. L'aggravation de l'empreinte écologique par les technologies de l'information . . . . .	103
4.5.2.1. Le secteur du numérique, un gigantesque dispositif matériel . . . . .	103
4.5.2.2. Dégagement de gaz à effet de serre . . . . .	104
4.5.2.3. La consommation massive de matières premières . . . . .	104
4.5.2.4. La forte consommation d'énergie . . . . .	105
4.5.2.5. Génération massive et croissante de déchets . . . . .	106
4.5.3. Un système autocroissant . . . . .	107
4.5.4. Les parades envisagées. . . . .	109
4.5.4.1. Les parades d'usage . . . . .	109
4.5.4.2. Les parades technologiques. . . . .	110
4.6. L'habitat et la construction, l'effet écologique de l'habitat et sa réponse technologique . . . . .	111
4.6.1. Les conséquences écologiques des activités de la construction. . .	112
4.6.2. L'effet écologique de la structure de l'habitat et de l'occupation de l'espace . . . . .	112
4.6.3. L'adaptation architecturale et urbanistique optimisée aux conditions climatiques . . . . .	112
4.6.4. De l'habitat « passoire thermique » à l'isolation des bâtiments . .	113
4.7. L'agriculture, l'élevage et la pêche . . . . .	113
4.7.1. L'agriculture dans l'Anthropocène. . . . .	114
4.7.1.1. Les limites écologiques . . . . .	114
4.7.1.2. Le développement de l'agriculture par conquête sur les espaces naturels : agriculture intensive et dégradation des terroirs. . . . .	115
4.7.2. Les réponses écotecnologiques . . . . .	116
4.7.2.1. L'agriculture écosystémique et régénérative. . . . .	116
4.7.2.2. Les réponses technologiques artificialistes. . . . .	117
4.7.3. L'agriculture cellulaire. . . . .	118

## **Chapitre 5. Les technologies émergentes réparatrices des effets de la crise écologique . . . . . 121**

5.1. L'économie circulaire : le recyclage et le reconditionnement . . . . .	122
5.1.1. Réutilisation et réemploi. . . . .	122
5.1.2. Le recyclage . . . . .	123
5.1.2.1. Le recyclage matière. . . . .	123
5.1.2.2. Le recyclage de produits et systèmes en fin de vie . . . . .	126
5.1.3. Le reconditionnement des produits et systèmes . . . . .	127

5.1.3.1. Le reconditionnement à l'identique pour prolongation de durée de vie, le développement d'un marché de la seconde main . . . . .	127
5.1.3.2. La refonte (réetrofit) des systèmes techniques pour leur mise aux normes écologiques . . . . .	128
5.1.4. L'économie circulaire locale : écologie industrielle et territoriale . . . . .	129
5.2. Une filière de décarbonation, le stockage et la valorisation du CO <sub>2</sub> . . . . .	130
5.2.1. Le stockage du CO <sub>2</sub> . . . . .	130
5.2.1.1. Les trois phases du <i>Carbon Capture and Storage</i> . . . . .	130
5.2.2. La valorisation du CO <sub>2</sub> . . . . .	132
5.2.2.1. La séquestration, transformation biologique du CO <sub>2</sub> . . . . .	133
5.3. La production artificielle de l'eau douce. . . . .	134
5.4. Des technologies réparatrices de la dégradation environnementale : ingénierie et génie écologique . . . . .	136
5.4.1. Les technologies d'ingénierie écologique réparatrice . . . . .	137
5.4.2. La géo-ingénierie . . . . .	138

**Partie 3. La mutation technologique pour la transition écologique, son processus et ses limites . . . . . 141**

**Introduction de la partie 3 . . . . . 143**

**Chapitre 6. Vers un nouveau système technologique . . . . . 145**

6.1. La destruction créatrice, première phase de la mutation technologique engendrée par la transition écologique . . . . .	145
6.2. Structure et formes d'un nouveau système technologique . . . . .	148
6.2.1. De nouvelles technologies génériques portées par l'exigence écologique . . . . .	148
6.2.1.1. Nouvelles technologies énergétiques . . . . .	148
6.2.1.2. Retour et dominance de la chimie : la « chimisation » écologique . . . . .	151
6.2.1.3. La biologie élargie, technologie générique majeure du nouveau système technologique . . . . .	152
6.2.2. Des technologies génériques traditionnelles réorientées par la transition écologique . . . . .	154
6.2.2.1. Les technologies numériques : des technologies d'appui à la transition écologique . . . . .	154
6.2.2.2. La technologie des matériaux reconsidérée . . . . .	155

6.2.3. Les technologies fonctionnelles spécifiques de la transition écologique . . . . .	156
6.2.3.1. Technologies du recyclage et de la valorisation des déchets . . . . .	156
6.2.3.2. Les technologies de production d'eau douce. . . . .	157
6.2.3.3. Les technologies de géo-ingénierie et de génie écologique . . . . .	158
6.3. Les voies de la transition écotechnologique. . . . .	158
6.3.1. Nouvelle logique du système technologique . . . . .	158
6.3.2. Les itinéraires de la mutation écotechnologique. . . . .	158
6.3.2.1. La première mutation incitative au mouvement technologique : l'élimination sélective des technologies traditionnelles . . . . .	159
6.3.2.2. Émergence de nouvelles technologies de rupture . . . . .	160
6.3.2.3. Réemploi, régénération de technologies connues . . . . .	160
6.3.2.4. Le recours à une technologie de substitution disponible. . . . .	160
6.3.2.5. Amélioration de l'efficacité d'une technologie traditionnelle non remplaçable . . . . .	160
6.3.2.6. « Divergence fonctionnelle » et diversification des technologies remplissant une même fonction pour réduire l'impact environnemental global. . . . .	161
6.3.2.7. Un processus progressif . . . . .	162
6.3.2.8. L'intégration du système . . . . .	162
<b>Chapitre 7. Modalités et limites de la transition . . . . .</b>	<b>165</b>
7.1. Le processus de la transition technoécologique. . . . .	166
7.1.1. Les moteurs de la mutation . . . . .	166
7.1.1.1. La puissance et la rapidité du courant d'innovation technologique. . . . .	166
7.1.1.2. Une contrainte au changement technologique portée par la puissance publique . . . . .	167
7.1.2. Les freins à la mutation . . . . .	169
7.1.2.1. L'inertie technologique . . . . .	169
7.1.2.2. Limitation quantitative du processus de transition par les ressources. . . . .	170
7.1.2.3. Limitations de la transition environnementale par les effets rebonds et effets de transferts . . . . .	171
7.1.2.4. Les facteurs économiques de l'inertie du mouvement de transition écotechnologique. . . . .	172
7.2. Limites d'efficacité de la mutation technologique pour la transition écologique . . . . .	174
7.2.1. L'effet de masse dans la crise écologique. . . . .	174

7.2.2. La reconfiguration du système technicoéconomique induite par la mutation technologique initiale (vers une logique de sobriété et de réduction de la croissance) . . . . .	176
7.2.2.1. Réorganisation du système industriel . . . . .	177
7.2.2.2. Une recomposition technologique de deuxième rang, le changement des produits et systèmes, recomposition des structures de consommation . . . . .	178
7.3. Évaluation prospective de la contribution de la mutation technologique et des changements sociétaux à la transition écologique . . . . .	181
7.3.1. Les enseignements d'un plan de transition environnemental : « The Shift Project » . . . . .	181
7.3.2. La modélisation prospective de quatre voies de la transition écologique, sur le cas de la France : Prospective transitions 2050 . . . . .	185
<b>Conclusion</b> . . . . .	<b>189</b>
<b>Bibliographie</b> . . . . .	<b>193</b>
<b>Index</b> . . . . .	<b>199</b>