

KARIM BEDDIAR
DOMINIQUE RENARD-BRAZZI

LA CONSTRUCTION CIRCULAIRE EN ACTION

ENJEUX ET OUTILS NUMÉRIQUES

DUNOD

Direction et conception graphiques de la couverture : Nicolas Wiel

Mise en pages : Nord Compo

Cet ouvrage a été réalisé avec le soutien de CESI.

NOUS NOUS ENGAGEONS EN FAVEUR DE L'ENVIRONNEMENT :



Nos livres sont imprimés sur des papiers certifiés pour réduire notre impact sur l'environnement.



Le format de nos ouvrages est pensé afin d'optimiser l'utilisation du papier.



Depuis plus de 30 ans, nous imprimons 70 % de nos livres en France et 25 % en Europe et nous mettons tout en œuvre pour augmenter cet engagement auprès des imprimeurs français.



Nous limitons l'utilisation du plastique sur nos ouvrages (film sur les couvertures et les livres).

© Dunod, 2024

11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff

www.dunod.com

ISBN 978-2-10-085788-3

Table des matières

Préface	11
Remerciements	15
Abréviations	17
Introduction	19
Chapitre 1 ■ L'économie circulaire : définitions et concepts	25
1.1 Contexte	25
1.1.1 Quelques chiffres	26
1.1.2 Le cuivre, illustration de la problématique	27
1.2 Définitions	29
1.3 Les composantes de l'économie circulaire	31
1.3.1 La prévention des déchets	32
1.3.2 L'écoconception	33
1.3.3 Le réemploi	36
Quelques exemples inspirants hors de la construction	37
<i>Petit Bateau</i>	37
<i>France Auto Reman</i>	38
1.3.4 Le recyclage	38
L'exemple des plastiques	38
L'exemple du plâtre	39
L'exemple du verre	39
1.3.5 La valorisation énergétique	41
1.3.6 L'économie de la fonctionnalité	42
Quelques exemples inspirants hors de la construction	42
<i>Decathlon</i>	42
1.3.7 L'économie de partage	43
Un exemple inspirant hors de la construction : BlaBlaCar	43
1.4 Les lois et réglementations	44
1.4.1 L'évolution des réglementations en Europe	44
Le pacte vert pour l'Europe	44
<i>La durabilité des produits</i>	45
<i>La réduction des déchets</i>	45

<i>La gestion des déchets de construction</i>	46
<i>L'utilisation de matériaux recyclés ou réemployés</i>	46
<i>La conception circulaire</i>	46
<i>La responsabilité élargie des producteurs (REP)</i>	46
<i>L'écoconception et les certifications</i>	46
<i>Le règlement sur les produits de construction</i>	47
<i>La CSRD</i>	47
1.5 L'écoconception dans les réglementations	49
1.6 Le passeport numérique de produit	49
1.7 L'évolution de la réglementation en France	50
1.8 La Chine, exemplaire ?	53
1.9 Les acteurs du changement	55
1.9.1 Les gouvernements	55
1.9.2 Les acteurs financiers	55
1.9.3 Les citoyens	55
1.10 Les autres éléments clés du changement	56
1.10.1 L'unification du langage entre le secteur financier et celui de la construction	56
1.10.2 L'adaptation des normes comptables	56
1.10.3 Le comblement du manque de compétences par l'éducation et des politiques adaptées	57
1.10.4 L'augmentation de l'attrait des carrières dans ce domaine	57
1.10.5 L'intégration de l'économie circulaire dans les programmes d'éducation et de formation professionnelle	57
1.11 L'indispensable adaptation des entreprises à l'économie circulaire	58
1.11.1 Les modèles économiques circulaires	58
1.11.2 L'innovation et la conception de produits	59
1.11.3 La chaîne d'approvisionnement durable	59
1.11.4 Les partenariats et la collaboration	59
1.11.5 La sensibilisation et la formation	60
1.11.6 La mesure et le suivi	60
1.12 Le <i>management lean</i> , clé de la réussite ?	60
1.13 Conclusion	61

Chapitre 2 ■ L'économie circulaire dans la construction	63
2.1 Le nécessaire changement de paradigme face aux mutations	63
2.2 La mutation du secteur de la construction	65
2.2.1 L'état actuel du secteur de la construction	67
Dans le monde	67
En France	70
<i>La crise du logement</i>	71
<i>L'impact écologique du bâtiment</i>	72
<i>La consommation de matières minérales</i>	74
<i>La gestion des déchets</i>	75
2.2.2 Les enjeux de la mutation	76
Les enjeux sociétaux	77
Les enjeux économiques	77
Les enjeux environnementaux et sanitaires	77
Les enjeux internes au secteur	78
<i>La focalisation quasi-exclusive sur les résultats financiers court-terme</i>	78
<i>Le manque d'innovation et une adoption différée</i>	79
<i>Le manque d'attractivité et de compétences</i>	80
<i>Les processus informels et le manque de rigueur et de cohérence en cours d'exécution</i>	80
<i>Le transfert insuffisant de connaissances d'un projet à l'autre</i>	80
<i>Le suivi faible du projet</i>	81
<i>Le manque de coopération interfonctionnelle</i>	81
<i>Le peu de collaboration avec les fournisseurs</i>	81
<i>Une culture d'entreprise conservatrice</i>	81
2.2.3 Les potentiels du secteur	82
2.3 La place de l'économie circulaire dans le secteur	83
2.3.1 L'économie circulaire et la construction industrialisée	83
2.3.2 La circularité de la construction hors-site	86
La réduction des déchets	86
Le réemploi et le recyclage des matériaux	87
2.3.3 L'économie circulaire et l'évolutivité/réversibilité des bâtiments	88
Définition des concepts	90
<i>La réversibilité</i>	90
<i>L'évolutivité</i>	90
<i>La modularité</i>	91
<i>La démontabilité</i>	91
<i>L'hybridation</i>	91
Comment et pourquoi construire des édifices évolutifs ?	91

2.3.4 Vers un bâtiment circulaire	96
Les conditions de la Commission européenne pour construire circulaire	99
<i>La durabilité</i>	99
<i>L'adaptabilité</i>	99
<i>La réduction des déchets et la facilitation d'une gestion des déchets optimale</i>	99
<i>La réversibilité</i>	100
2.4 Conclusion	102
Chapitre 3 ■ L'économie circulaire à l'ère du numérique	103
3.1 Introduction	103
3.2 Le concept de construction numérique et de construction 4.0	105
3.2.1 Les technologies de l'information et de la communication (TIC)	106
3.2.2 Les techniques automatisées et industrielles	106
3.3 La construction 4.0 et l'éco-responsabilité	108
3.4 Le BIM et l'économie circulaire dans la construction	110
3.4.1 Le BIM	110
Le BIM et la conception circulaire	111
<i>La rationalisation de la conception et la coordination</i>	113
<i>L'amélioration de la productivité</i>	113
<i>L'amélioration du contrôle qualité</i>	113
<i>L'amélioration de la sécurité</i>	113
<i>La réduction des déchets et de l'impact environnemental</i>	114
<i>L'optimisation de l'acte de conception</i>	114
<i>Les analyses (des lots) techniques</i>	115
<i>La coordination 3D (la détection des collisions)</i>	115
<i>L'estimation des quantités et des coûts</i>	115
Le BIM et l'analyse de cycle de vie, outil clé de l'économie circulaire	116
Le BIM et la (re)valorisation des matériaux	116
<i>Le BIM et la déconstruction</i>	116
<i>La réutilisation de matériaux de construction</i>	117
<i>Le BIM et le passeport matériaux</i>	118
<i>Un exemple de passeport matériaux : Madaster</i>	119
<i>Le BIM et la gestion des déchets</i>	120
<i>Le BIM et l'économie d'énergie</i>	123
<i>Conclusion</i>	124
3.5 L'IA et l'économie circulaire dans la construction	125
3.5.1 L'IA dans la construction	126
L'optimisation des bâtiments grâce à la conception générative	127
<i>La diminution des risques</i>	127
<i>L'amélioration de la production sur chantier</i>	127
<i>L'optimisation des coûts</i>	128

Table des matières

<i>L'optimisation de la planification des projets</i>	128
<i>L'amélioration de la sécurité sur chantier</i>	128
<i>Une meilleure gestion de la main-d'œuvre</i>	129
<i>L'optimisation de la construction hors-site</i>	129
<i>L'optimisation de la phase de maintenance/exploitation</i>	129
L'IA et l'économie circulaire	130
<i>L'optimisation</i>	130
<i>La prévision</i>	131
<i>La synthèse</i>	131
L'IA et la gestion des déchets	133
<i>Un tri efficace des déchets</i>	133
<i>L'analyse prédictive pour la production de déchets</i>	133
<i>L'optimisation de l'efficacité énergétique</i>	134
<i>La planification intelligente de la déconstruction</i>	134
Conclusion	134
3.6 La <i>blockchain</i> et l'économie circulaire de construction	136
3.6.1 Traçabilité et responsabilité améliorées	136
3.6.2 Allocation efficace des ressources	137
3.6.3 Prévention de la fraude et renforcement de la confiance	137
3.6.4 Incitation au recyclage	138
Exemples d'utilisation	138
<i>WasteCoin : récompenser les efforts de recyclage</i>	138
<i>Plastic Bank : lutter contre la pollution plastique des océans</i>	138
<i>VeChain : améliorer la traçabilité de la chaîne d'approvisionnement</i>	139
3.6.5 Les défis et considérations de la <i>blockchain</i>	139
Difficulté d'adoption	139
Intégration avec les systèmes existants	139
Évolutivité	139
3.6.6 Conclusion	139
3.7 Le <i>lean</i> et l'économie circulaire dans la construction	140
3.7.1 <i>Lean</i> et environnement	140
3.7.2 Le <i>lean</i> digital	143
Flexibilité et robustesse	144
Innovation et amélioration continue	144
Gestion des risques	144
Utilisation optimale des ressources	144
Développement des compétences	145
Amélioration de la prise de décision	145
Résilience organisationnelle	145
<i>Lean digital et green</i>	145
3.7.4 Conclusion	146

3.8	Vers une circularité forte	146
3.9	Vers la généralisation du <i>low-tech</i>	147
3.9.1	L'impact environnemental des technologies numériques	148
3.9.2	Un numérique responsable et circulaire	149
3.10	Conclusion	152
Chapitre 4	■ Les leviers d'adoption et d'accélération	153
4.1	La nécessaire accélération de l'adoption de l'économie circulaire	153
4.1.1	Les freins à l'économie circulaire	155
	Un marché peu développé	155
	Des cadres juridiques et assurantiels peu développés	156
	Un changement de comportement difficile à opérer	156
	Des acteurs peu sensibilisés et peu impliqués	156
	Un manque de compétences dans le domaine	156
	Un manque de recherche et d'innovation	157
4.2	Le rôle de la formation et la montée en compétences	157
4.2.1	Introduction	157
4.2.2	Les impacts des transitions numériques et écologiques sur l'emploi	159
4.2.3	Le rôle de la formation dans la construction circulaire	162
4.2.4	Les métiers de la construction circulaire	164
	Concepteur de sobriété	166
	Mineur urbain	167
	Commerçant/trader de déchets	167
	Technologue circulaire	167
4.3	Le rôle de la recherche et l'innovation	168
4.3.1	La recherche et l'innovation en Europe	168
	Les projets	169
	<i>L'Union de l'innovation</i>	169
	<i>Horizon 2020 et Horizon Europe</i>	169
4.3.2	La recherche et l'innovation en France	170
	La particularité de la recherche en France	172
4.4	La recherche et innovation dans l'économie circulaire	174
4.4.1	Sobriété et frugalité	175
4.4.2	Allongement de la durée de vie des matériaux et des équipements	175

4.4.3 Régénération des ressources et diminution des déchets	176
Déconstruire sélectivement	176
Réemployer et réutiliser	176
4.4.4 Management du projet	177
4.5 Le rôle des pouvoirs publics et des parties prenantes	178
4.5.1 Le rôle des pouvoirs publics	178
4.5.2 Le rôle des parties prenantes	179
4.5.3 La collaboration entre les pouvoirs publics et les parties prenantes	181
Écoquartiers	181
Plates-formes de réemploi des matériaux de construction	181
Rénovation énergétique	181
Développement de normes et labels durables	181
Programmes de formation et de sensibilisation	181
4.6 Conclusion	182
Chapitre 5 ■ Études de cas	183
5.1 Introduction	183
5.2 L'adoption et le développement de l'économie circulaire (Acorus et Afleya)	184
5.2.1 Acorus : reconditionnement et réutilisation des matériaux de plomberie et sanitaires	185
Détails du projet	186
5.2.2 Akibo d'Afleya : numérisation de l'économie circulaire	188
Détails du projet	188
L'intégration des innovations numériques et physiques	189
5.2.3 Conclusion	190
5.3 Le réemploi et l'aménagement intérieur (Hôpital franco-britannique et Moduloop)	190
5.3.1 Le contexte	190
5.3.2 Présentation du projet	191
5.3.3 Détails du projet	192
5.3.4 Volet digital du projet	192
5.4 La réversibilité des bâtiments (Black Swans)	195
5.4.1 Détails du projet	197
Architecture	197
Performance énergétique	197
Réversibilité et adaptabilité	198

5.4.2 Le projet final	199
5.4.3 L'économie circulaire dans le projet	199
5.5 Matériau et économie circulaire (le <i>hempcrete</i> , États-Unis)	200
5.5.1 Genèse du projet	201
5.5.2 Acteurs du projet	202
5.5.3 Description du projet	203
5.6 Conclusion	204
Conclusion générale	207
Bibliographie et webographie	209
Index	217

Préface

Cette préface m'offre l'occasion de rappeler les défis et opportunités que présente l'adoption d'une économie plus « circulaire » dans l'un des secteurs clés de notre économie : le bâtiment. Ce domaine est à la fois un pilier de l'économie mondiale et un acteur majeur pour la maîtrise de la consommation des ressources naturelles et la limitation de la production des émissions de gaz à effet de serre. Il se trouve aujourd'hui à un carrefour.

Face à l'accélération de l'urbanisation, à l'augmentation de la population mondiale, et aux défis posés par le dérèglement climatique, la question n'est plus de savoir si le secteur du bâtiment doit évoluer, mais plutôt comment il peut le faire de manière durable et résiliente. La réponse à cette question réside, en partie, dans l'adoption des principes de l'économie circulaire. Ce modèle économique, qui contraste avec l'économie linéaire traditionnelle d'extraction, de fabrication, d'utilisation et de mise au rebut, propose une approche dans laquelle l'utilisation des ressources est prolongée efficacement pour un même usage ou un usage différent à travers le réemploi, la réutilisation et le recyclage des matériaux.

Le livre *La construction circulaire en action* arrive à un moment critique. Alors que la réduction de notre empreinte carbone et la gestion plus responsable de nos ressources ne sont plus une option, cet ouvrage offre une vision et une voie à suivre pour rendre plus « circulaire », et donc plus durable, le secteur du bâtiment. En ma qualité de président de la Fédération française du bâtiment, je perçois non seulement l'impératif, mais également l'urgence pour notre filière d'accélérer résolument cet engagement vers un modèle économique plus responsable. Cette conviction s'ancre dans une réalité que nous vivons déjà : le secteur est en pleine mutation vers des pratiques plus respectueuses de notre environnement, déjà réclamées par bon nombre de nos maîtres d'ouvrage et déjà imposées sous certains aspects, par des réglementations qui figurent parmi les plus exigeantes du monde. La réglementation environnementale 2020 (RE 2020) sur les bâtiments neufs et la mise en place d'une filière responsabilité élargie du producteur pour le bâtiment ne sont que deux exemples emblématiques parmi d'autres.

Le rôle de notre secteur dépasse la simple participation : il s'agit d'une mission cruciale, un devoir impérieux qui nous incombe. Adopter ces nouvelles pratiques est une nécessité absolue pour assurer la viabilité de nos métiers à long terme, notre compétitivité et notre capacité à innover. La transition vers la circularité est une formidable opportunité de redéfinir notre filière, d'améliorer notre efficacité et de repenser les manières de construire : trier les déchets des chantiers d'aujourd'hui pour devenir les ressources des projets de demain, raccourcir les distances pour privilégier le local et réduire l'empreinte carbone, écoconcevoir les bâtiments pour avoir la capacité de s'adapter aux usages qui évoluent, etc. Nous ne sommes pas à la veille de cette révolution : nous sommes déjà mobilisés, portés par des artisans et des entreprises engagés.

L'économie circulaire n'est pas seulement une question de gestion environnementale, c'est une stratégie économique et sociale qui peut conduire à d'importantes innovations, à l'amélioration de la compétitivité, et à la création d'emplois. Dans le secteur du bâtiment, cela signifie repenser nos matériaux, nos méthodes de conception, et nos processus de construction pour qu'ils soient plus flexibles, plus efficaces et moins dépendants des ressources non renouvelables.

Le passage à une économie circulaire n'est cependant pas une tâche facile. Il nécessite une redéfinition de nombreuses pratiques établies, des matériaux que nous utilisons aux techniques de construction que nous employons, en passant par la manière dont nous concevons l'ensemble du cycle de vie des bâtiments. Ce livre démontre comment les technologies numériques telles que le BIM, l'IA ou encore les jumeaux numériques peuvent jouer un rôle crucial pour faciliter la transition vers des pratiques de construction circulaire telles que l'optimisation de la planification, de la construction et de la gestion des bâtiments tout au long de leur cycle de vie et au-delà. Les bâtiments d'aujourd'hui sont en effet les potentielles banques de matériaux de demain que l'outil numérique nous aidera à valoriser toujours plus loin.

Les défis sont certes nombreux, mais les opportunités le sont tout autant. En orientant le secteur du bâtiment vers une économie circulaire, nous pouvons réduire notre consommation d'énergie, notre dépendance aux matériaux non renouvelables et minimiser les déchets de construction et de démolition. Ce faisant, nous répondons non seulement aux exigences réglementaires et aux attentes croissantes des maîtres d'ouvrage en matière de durabilité, mais nous ouvrons également la voie à de nouvelles formes de valeurs économique, sociale et environnementale incluant notamment le coût « carbone » de la construction dont la maîtrise pour nos entreprises devient incontournable.

Je suis convaincu que *La construction circulaire en action* est un ouvrage essentiel pour tous ceux qui sont engagés dans la transformation environnementale et numérique du secteur du bâtiment. Son message est clair : en suivant les principes et les stratégies exposés dans cet ouvrage, nous facilitons l'intégration de pratiques durables au cœur même de notre secteur, guidant ainsi de nombreux professionnels vers des pratiques qui garantissent non seulement la viabilité de leurs projets, mais aussi celle de toute une filière.

Enfin, en préfaçant ce livre, je souhaite non seulement saluer le travail remarquable de ses auteurs, mais aussi encourager chaque professionnel du bâtiment à prendre part à cette transition essentielle. C'est en partageant nos connaissances, en collaborant et en innovant que nous pourrons construire un avenir plus durable pour nous tous.

Olivier Salleron

Président de la Fédération française du bâtiment

Remerciements

Cet ouvrage est le fruit de longs et studieux questionnements, d'un état de l'art sur le sujet, de rencontres, d'échanges avec d'experts, etc. et de nombreuses heures de rédaction et d'efforts sur un sujet d'actualité, essentiel à la profession.

Nous adressons d'abord nos remerciements et notre gratitude à Monsieur Olivier Salleron, président de la Fédération française du bâtiment d'avoir accepté de préfacier cet ouvrage.

Nous tenons également à remercier chaleureusement les entreprises et institutions suivantes de nous avoir fourni des informations ainsi que des illustrations pour alimenter cet ouvrage parmi elles : Afleya, Acorus, CESI et Moduloop.

La rédaction d'un livre est un lourd investissement, d'intenses efforts, consentis en dehors des heures de travail, nous devons, enfin remercier nos familles pour leur patience et leur compréhension.

Abréviations

- ACV : analyse du cycle de vie
- ADEME : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
- AGEC : loi anti-gaspillage pour une économie circulaire
- ANR : Agence nationale de la recherche
- BAMB : *Buildings As Material Banks*
- BBC : bâtiment basse consommation
- BBCA : bâtiment bas carbone
- BEM : *Building Energy Modeling* (modélisation énergétique des bâtiments)
- BePOS : bâtiment à énergie positive
- BIM : *Building Information Management* ou *Modeling* ou *Model*
- BREEAM : *Building Research Establishment Environmental Assessment Method*
- CSR : combustibles solides de récupération
- CSRD : *Corporate Sustainability Reporting Directive*
- CSTB : Centre scientifique et technique du bâtiment
- CVC : chauffage ventilation climatisation
- DfD : *Design for Deconstruction*
- DfMAD : *Design for Manufacturing and Assembly and DisAssembly*
- DfMA-D : *Design for Manufacturing and Assembly and Disassembly*
- DIRDE : dépense intérieure de recherche et développement des entreprises
- DPE : diagnostic de performance énergétique
- DPP : passeport numérique de produit
- EnR : énergie renouvelable
- ESRS : *European Sustainability Reporting Standards*
- GES : gaz à effet de serre
- HPE : haute performance environnementale
- HQE : haute qualité environnementale
- IA : intelligence artificielle
- IEA : *International Energy Agency*
- IFC : *Industry Foundation Classes*
- IoT : *Internet of Things* (Internet des objets)

Abréviations

- ITE : isolation thermique par l'extérieur
- JIT : *Just-In-Time*
- LEED : *Leadership in Energy and Environmental Design*
- OIT : Organisation internationale du travail
- PCE : produits de construction et équipements
- PEMD : produits, équipements, matériaux et déchets
- PLM : *Product Lifecycle Management*
- PNPD : plan national de prévention des déchets
- PPP : partenariats publics privés
- QAI : qualité de l'air intérieur
- RE 2020 : réglementation environnementale 2020
- SNBC stratégie nationale bas carbone
- TECV : transition énergétique pour la croissance verte
- TIC : technologies de l'information et de la communication
- TPM :
- UE : Union européenne
- VSM : *Value Stream Mapping*