

**M
A**

TÉ

**MATÉRIAUX
POUR UN DESIGN PRODUIT
ÉCO-RESPONSABLE**

**R
I**

AUX

L'édition originale de cet ouvrage a été publiée en langue anglaise sous le titre *Better Things* par Laurence King Publishing Ltd., Londres.

Published in Great Britain in 2023 by

Laurence King Student & Professional
An imprint of Quercus Editions Ltd
Carmelite House
50 Victoria Embankment
London EC4Y 0DZ

An Hachette UK company

Copyright © 2024 Daniel Liden

Dunod, Malakoff, 2024 pour la traduction française
ISBN 978-2-10-086017-3

Mise en page pour la traduction : Nord Compo
Adaptation couverture : Nicolas Wiel

Selon le droit moral Daniel Liden est identifié comme l'auteur de ce travail a été affirmé conformément aux droits d'auteur, dessins et modèles et Loi sur les brevets, 1988.

Tous droits réservés. Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ou transmise sous quelque forme que ce soit ou par tout moyen, électronique ou mécanique, y compris photocopie, enregistrement ou stockage d'information et système de récupération, sans autorisation écrite de l'éditeur.

Par la présente, Quercus Editions Ltd exclut, dans la mesure permise par la loi, toute responsabilité pour toute erreur ou omission dans ce livre et pour toute perte, tout dommage ou toute dépense (directe ou indirecte) subis par un tiers qui se serait basé sur une information contenue dans ce livre.

Rédactrice en chef : Liz Faber

Rédactrice en chef du projet : Angela Koo

Conception du design : Daniel Liden

Mise en page : Jane Lanaway

Ouvrage imprimé en Malaisie par 1010

À ma fille Lärke, pour avoir toujours posé les grandes questions comme « De quoi tout est fait ? »

Et à George, qui a toujours osé tenter de répondre à ces grandes questions. Tu me manques, mon ami.

DUNOD

Les papiers utilisés par Quercus proviennent de forêts gérées durablement et d'autres sources responsables.



**M
A**

TÉ

**MATÉRIAUX
POUR UN DESIGN PRODUIT
ÉCO-RESPONSABLE**

**R
I**

**DANIEL LIDEN
TRADUCTION DE JEAN-LOUIS
CLAUZIER**

AUX

DUNOD

Sommaire

Avant-propos	6		
Introduction	8		
CHAPITRE 1 : MATIÈRES PLASTIQUES	16	CHAPITRE 2 : TEXTILES	72
Recyclage du plastique	20	Recyclage des textiles	74
<i>Interview : Efrat Friedland</i>	24	<i>Interview : Michael Wolf</i>	76
Polypropylène (PP) recyclé	28	Textiles en polyester (PET) recyclé	80
Polyéthylène (PE) recyclé	30	Textiles en polyamide (PA) recyclé	82
Polyéthylène téréphtalate (PET) recyclé	32	Textiles synthétiques	
Acrylonitrile butadiène styrène (ABS) recyclé	34	à base de cellulose recyclée	84
Polycarbonate (PC) recyclé	36	Textiles en coton recyclé	86
Polyamide (PA) recyclé	38	Textiles en laine recyclée	88
Élastomères thermoplastiques (TPE) recyclés	40	Cuir recyclé	90
Caoutchouc de silicone recyclé	42	Textiles renouvelables	92
Caoutchouc naturel recyclé	44	<i>Interview : Charlotte McCurdy</i>	94
Plastiques renouvelables	46	Textiles en polyester (PET) renouvelable	98
<i>Interview : Pilar Bolumburu</i>	50	Textiles en polyamide (PA) renouvelable	100
Polypropylène (PP) renouvelable	54	Textiles synthétiques à base de cellulose	102
Polyéthylène (PE) renouvelable	56	Textiles en acide polylactique (PLA)	104
Acide polylactique (PLA)	58	Cuir synthétique renouvelable	106
Acétate de cellulose (AC)	60	Textiles en coton	108
Polycarbonate (PC) renouvelable	62	Textiles en laine	110
Polyamide (PA) renouvelable	64	Cuir	112
Résine époxy liquide (LER) renouvelable	66	CHAPITRE 3 : MÉTAUX	114
Élastomères thermoplastiques (TPE) renouvelables	68	<i>Interview : Richard Hutten</i>	116
Caoutchouc naturel	70	Recyclage des métaux	120
		Aluminium recyclé pour l'extrusion	122
		Aluminium recyclé pour les applications en tôle	124
		Aluminium recyclé pour le moulage	126
		Acier recyclé	128
		Acier inoxydable recyclé	130
		Métaux bas-carbone	132
		Aluminium bas-carbone	134
		Acier bas-carbone	136

CHAPITRE 4 : CÉRAMIQUES ET VERRE	138	Papier vierge	198
<i>Interview : Ward Massa</i>	140	Papier d'emballage	200
Recyclage de la céramique	144	Papier barrière	202
Argile pour briques à base de déchets	146	Papier translucide	204
Terrazzo	148	Papier d'emballage	
Pierre frittée	150	à base de fibres alternatives	206
Recyclage du verre	152	Carton	208
Verre d'emballage sodocalcique recyclé	154	Carton barrière	210
Verre plat et verre soufflé recyclé	156	Carton à fibres alternatives	212
Verre fusionné recyclé	158	Pâte à papier moulée	214
Verre borosilicaté recyclé	160		
CHAPITRE 5 : BOIS	162	CHAPITRE 7 : TECHNOLOGIES	
<i>Interview : Henrik Taudorf Lorensen</i>	164	ÉMERGENTES	
Bois massif	168	POUR DES MATÉRIAUX	
Bois d'ingénierie	172	DURABLES	216
Contreplaqué NAF	174	<i>Interview : Teresa van Dongen</i>	218
Panneau de fibres		Capture et utilisation du carbone (CCU)	222
à moyenne densité (MDF) NAF	176	Processus de croissance naturelle	224
Panneau de lamelles orientées		Recyclage chimique du plastique	226
(OSB) NAF	178	Recyclage mécanique	
Stratifiés haute pression (HPL)	180	des plastiques mélangés	228
Composites de liège	182	Composites plastiques monomatériaux	230
CHAPITRE 6 : PAPIER	184	Notes	232
<i>Interview : Riccardo Cavaciocchi</i>	186	Glossaire	234
Recyclage du papier	190	Ressources	235
Papier d'emballage recyclé	192	Index	236
Carton recyclé	194	Remerciements et crédits photographiques	240
Pâte à papier moulée recyclée	196		

Avant-propos

Aux débuts du design industriel, tout processus créatif commençait par un croquis ; le choix des matériaux n'arrivait que par la suite. Actuellement, on a appris à utiliser les matériaux comme support narratif, et on s'en sert pour façonner l'expérience utilisateur des produits et des marques. De plus en plus, face à l'essor fulgurant de la production, ces récits et ces expériences insistent sur le développement durable ; or, les matériaux sont le principal moyen d'influence du designer qui cherche à limiter l'empreinte écologique des produits.

Pourtant, prendre les matériaux comme point de départ ne va pas de soi, car ceux-ci ne cessent d'évoluer on ne sait trop dans quelle direction, pour répondre à des objectifs eux-mêmes incertains. Les matériaux sont donc un sujet extraordinairement difficile à maîtriser pleinement. J'ai entendu récemment quelqu'un dire que les matériaux et le développement durable sont une sorte de Far West : un nouvel espace à défricher, auquel il faut s'adapter à mesure qu'on l'explore.

À cette complexité d'un champ en mutation très rapide, vient s'ajouter la charge émotionnelle liée aux questions d'environnement. Ainsi, on comprend pourquoi un designer hésite souvent à se lancer pour affirmer qu'un matériau est meilleur pour l'environnement qu'un autre : il craint que quelqu'un d'autre ne vienne exhumé un argument pour démontrer que son choix est discutable. « Laissez donc les petits chats tranquilles ! », répétait mon ami Ed Thomas à son équipe lorsqu'il était directeur du design des matériaux chez Nike. Il voulait dire par là qu'on peut laisser évoluer une idée inaboutie, même si ce n'est pas encore la solution optimale. Trouver le bon matériau peut s'avérer une tâche très délicate, ce qui conduit souvent le designer à prendre des décisions assez frileuses.

Sur le choix des matériaux, les avis sur ce qu'il faut faire, et surtout sur ce qu'il ne faut pas faire, sont légion. La durabilité ne se limite pas à choisir entre un matériau et un autre, et il n'y aura jamais une frontière nette entre un bon et un mauvais matériau. Pour le designer, rechercher la durabilité consiste à définir quelle approche est la plus adaptée à tel domaine ou à tel produit, à anticiper la durée de vie optimale et le flux de déchet prévu lors de l'élimination, pour optimiser les possibilités de récupération. Comprendre ces complexités et savoir en jouer est le secret pour parvenir au bon choix en matière de matériaux durables.

Dans ce Far West des matériaux et du développement durable, Daniel a toujours été un designer de pointe. Premièrement, il a su comprendre en profondeur le rôle des matériaux et de la durabilité dans le processus de conception et de développement d'un produit. Ensuite, il a su trouver un équilibre entre les exigences fonctionnelles des matériaux et leur valeur affective symbolique pour le client. Cet équilibre lui a permis de saisir le niveau d'information le plus adapté à ce livre. Pour les designers confrontés à la complexité des matériaux et de leur durabilité, accéder à cette information est essentiel.

Les livres sur l'environnement ne manquent pas, mais rares sont ceux qui l'abordent spécifiquement sous l'angle des matériaux et, en particulier, du design et du choix des matériaux. C'est pourquoi cet ouvrage, avec son organisation systématique par catégories de matériaux, vous aide à vous y retrouver, en proposant une pluralité de démarches et de stratégies à mettre en œuvre concrètement. Au terme de cet ouvrage, vous ne craignez plus de vous aventurer dans la complexité des matériaux et de leur durabilité.

Chris Lefteri

Introduction

J'estime que la conception d'un produit doit commencer par les matériaux et les processus. Telle est la base de tout produit. Pourtant, malgré ce rôle central des matériaux, le designer a du mal à trouver des informations claires concernant leur empreinte écologique. Il est courant de trouver des matériaux avec la simple mention « sans plastique », « recyclé » ou « biosourcé », sans précisions réelles concernant leur origine ou leur impact sur l'environnement, ce qui prête souvent à confusion, et dans le pire des cas au *greenwashing*. Heureusement, une grille d'analyse est en voie de constitution, permettant d'évaluer l'empreinte écologique des matériaux. Ce mouvement s'opère avec le soutien des consommateurs, dans le cadre législatif de marchés clés, notamment l'Union européenne.

Ce livre réunit l'ensemble des informations et données utiles que j'ai pu trouver sur toute une gamme de matériaux ; il est organisé en sept chapitres abordant chacun une famille : matières plastiques, textiles, métaux, verre et céramiques, bois, papier, et enfin les nouveaux matériaux durables. Il mentionne les atouts et points faibles de chaque matériau d'un point de vue écologique et propose une introduction aux concepts

et aux stratégies de durabilité. La durabilité est une notion complexe ; j'espère que ce livre contribuera à en élucider les contours et vous aidera à prendre des décisions éclairées dans le design et le choix des matériaux.

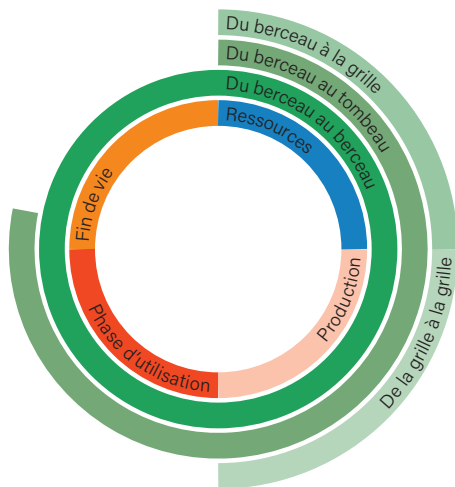
Mesurer l'impact sur l'environnement

De plus en plus, les fournisseurs sont tenus de mesurer l'impact environnemental des matériaux qu'ils vendent et de publier les résultats, en réalisant une analyse du cycle de vie (ACV) partielle, prenant en compte la partie amont du cycle. Ce type d'analyse, dite « *cradle to gate* » (« du berceau à la grille »), prend en compte les différentes étapes de la fabrication du matériau, depuis l'extraction et le raffinement de la matière première jusqu'à la sortie d'usine. Cette analyse se distingue d'une étude ACV complète, qui porte sur la totalité du cycle de vie, de la matière brute à la fabrication, et jusqu'à la mise au rebut du produit. Le schéma ci-contre donne un aperçu général des principales variantes d'ACV.

Les données environnementales concernant les matériaux présentées dans cet ouvrage s'appuient sur des analyses du « berceau à la grille » réalisées par des fournisseurs, des organisations professionnelles et d'autres sources, référencées en notes

Analyse de cycle de vie (ACV)

Les ACV du « berceau au berceau » et du « berceau au tombeau » couvrent toute la durée de vie des produits, tandis que les ACV partielles, telles que les études du « berceau à la grille » et de la « grille à la grille », portent sur des phases spécifiques, telles que la production des matériaux et la fabrication du produit.



- **Ressources**
Extraction et raffinement des matières premières en matériaux utilisables dans la production de biens.
- **Fabrication**
Formation, finition et assemblage des produits, mais aussi conditionnement et distribution.
- **Phase d'utilisation**
Consommation d'énergie et autres consommables lors de l'utilisation du produit, entretien et réparations.
- **Fin de vie**
Collecte et traitement des déchets, ce qui, dans un cycle de vie du « berceau au tombeau », implique l'incinération ou la mise en décharge, tandis que les options du « berceau au berceau » supposent le démantèlement et le recyclage des produits, le compostage ou d'autres processus assurant le maintien en circulation des matériaux.

à la fin de l'ouvrage (voir p. 232-233). Quand on recherche des informations environnementales sur les matériaux, il est utile de comprendre les bases du modèle d'ACV, car les fournisseurs ont tendance à utiliser différents termes – outre l'analyse du « berceau à la grille », principalement l'inventaire du cycle de vie (ICV), la déclaration environnementale de produit (EPD) et l'ACV proprement dite.

Cet effort de transparence de la part des fournisseurs de matériaux mérite d'être salué. Il n'en reste pas moins que les chiffres présentés ici doivent être pris comme de simples indications et non comme des valeurs absolues. À ce jour, les ACV ne sont pas toujours standardisées, ce qui rend difficile toute comparaison précise entre différentes études, à moins d'être un expert dans le domaine. La Commission européenne a introduit une nouvelle méthodologie et une nouvelle norme pour les ACV, l'empreinte environnementale des produits (*Product Environmental Footprint*, ou PEF), qui devrait devenir obligatoire dans l'UE en 2024 et qui facilitera grandement l'interprétation et la comparaison des résultats d'ACV. En attendant, les données présentées dans cet ouvrage peuvent servir de guides ;

vous pourrez ainsi vous concentrer sur les vrais problèmes, ceux pour lesquels on peut espérer réduire l'impact environnemental des produits. Je vous recommande vivement d'examiner à la fois chaque matière prise isolément et le contexte général, sous forme de statistiques et autres informations présentées au début de chaque chapitre et partie de l'ouvrage. Par exemple, on peut dire que les plastiques posent davantage un problème en termes de déchets que d'émissions. Inversement, les métaux posent un problème d'émissions plutôt que de déchets. En prenant en compte le contexte global, vous devriez cibler plus précisément les domaines les plus impactés par vos choix.

Une introduction approfondie à la méthodologie de l'ACV dépasse le cadre de cet ouvrage, mais si vous souhaitez en savoir plus, la liste des ressources (page 235) propose des liens vers des logiciels d'ACV, des supports d'apprentissage et des bases de données environnementales sur les matériaux accessibles au public. Je vous engage également à demander aux fournisseurs des données environnementales sur les matériaux et les qualités spécifiques que vous envisagez d'utiliser, car ils ne fournissent souvent ces données que sur demande.

Énergie, dioxyde de carbone et élaboration de matériaux

À ce jour, on peut raisonnablement affirmer que l'intérêt majeur le plus reconnu des ACV consiste à calculer les émissions de gaz à effet de serre (GES) et leur impact sur le réchauffement climatique. Le dioxyde de carbone (CO₂) est loin d'être le seul GES, mais le volume des émissions de CO₂ dans la fabrication des matériaux et son impact sur le réchauffement de la planète en font un sujet important dans ce livre. Pour bien comprendre le rôle du carbone pour la production industrielle et le réchauffement climatique, il faut étudier plus en détail le cycle du carbone, un processus naturel fondamental sans lequel aucune vie sur terre ne serait possible.

Le cycle du carbone comprend deux éléments : le cycle rapide et le cycle lent. Le premier relie toutes les formes de vie sur la planète en temps réel et d'une manière très concrète. Les humains et les animaux inspirent de l'oxygène (O₂) et rejettent du CO₂, tandis que les plantes absorbent du CO₂ et rejettent de l'O₂ dans l'atmosphère. Le cycle lent repose sur des processus chimiques et géologiques au cours desquels les matières organiques se fossilisent et séquestrent le carbone sous terre et au fond des océans au fil de centaines de millions d'années.

Lorsque nous extrayons de grandes quantités de ce carbone séquestré sous forme de pétrole, de gaz naturel ou de charbon et le brûlons pour produire de l'énergie, nous perturbons le cycle rapide du carbone en libérant dans l'atmosphère plus de CO₂ que ne peuvent en absorber les plantes à la surface du globe. C'est problématique car le CO₂, comme les autres GES, piège la chaleur dans l'atmosphère, ce qui réchauffe lentement la planète. Ce qui est vraiment effrayant avec celui-ci, c'est que si la végétation ne suffit pas à l'absorber, il reste dans l'atmosphère indéfiniment.

La relation entre l'industrie des matériaux, le CO₂ et le réchauffement climatique est au moins triple. L'essentiel des émissions de CO₂ issues de l'industrie des matériaux provient de l'énergie produite à partir du charbon, du gaz

naturel et d'autres combustibles fossiles. Or, la production de matériaux consomme souvent beaucoup d'énergie. Mais le carbone est aussi un composant essentiel des matériaux. Un arbre est normalement constitué de 50 % de carbone, tandis que pour le plastique, c'est d'environ 80 %. Lors de l'incinération, le carbone incorporé dans ces matériaux est rejeté dans l'atmosphère sous forme de CO₂. Enfin, la surexploitation de matériaux issus de la biomasse peut conduire à la déforestation, réduisant ainsi la capacité d'absorption du CO₂ à travers le monde.

Le potentiel de réchauffement global (PRG) est une mesure de la quantité de chaleur que les différents GES piègent dans l'atmosphère, en utilisant le CO₂ comme étalon. Cette méthode permet de résumer toutes les émissions de GES en un seul chiffre, exprimé en équivalent CO₂, ou CO₂eq. Les émissions de GES des matériaux recensés dans cet ouvrage sont toutes indiquées sous forme PRG en kilos de CO₂eq par kilo de matière. Ces chiffres sont toutefois à manier avec prudence, en particulier si l'on compare l'impact de différents matériaux. Tout d'abord, en fonction des matériaux utilisés, un même produit ou une même pièce pourront avoir des caractéristiques très différentes : épaisseur des parois, nervures de renfort, ou encore volume global. De plus, la densité varie considérablement d'un matériau à l'autre : l'acier est environ trois fois plus dense que l'aluminium ; pour comparer les émissions de ces matériaux, il faut donc se baser sur le poids d'une pièce donnée, plutôt que kilo par kilo.

Enfin, si les émissions de gaz à effet de serre liés aux matériaux posent effectivement un réel problème environnemental, c'est loin d'être le seul. D'autres aspects de la fabrication des matériaux posent également des défis urgents qui appellent des solutions durables, notamment la surexploitation des ressources renouvelables ou non renouvelables, les ingrédients et sous-produits toxiques, ainsi qu'une montagne croissante de déchets. Regardons cela plus en détail.

L'origine des matières premières

Au niveau le plus général, on peut distinguer les matériaux renouvelables et non

renouvelables. Vous verrez souvent que tout matériau renouvelable est vendu comme étant plus durable qu'un matériau non renouvelable ; or, en creusant un peu, on s'aperçoit que les choses sont plus complexes. Ainsi, les forêts sont bien une ressource renouvelable, mais en réalité, elles sont souvent l'objet d'une exploitation irresponsable, voire de coupes illégales, qui finiront par provoquer des catastrophes écologiques si on n'y met pas un terme. Les forêts sont un élément essentiel du cycle carbone : la déforestation compromet fortement leur capacité d'absorber le CO₂. La surexploitation de celles-ci entraîne une érosion des sols, qui rend difficile de replanter des arbres (ou quoi que ce soit) et aboutit, à long terme, à la désertification. Plus récemment, les monocultures forestières, dédiées exclusivement à une seule essence d'arbre, ont été dénoncées pour leur impact énorme sur les écosystèmes et les populations locales. Il existe une tension entre deux impératifs contradictoires : d'un côté, la sylviculture commerciale vise à maximiser les rendements ; de l'autre, la vie de la forêt exige de laisser se dérouler les processus naturels, notamment la lente décomposition des arbres morts, qui servent de refuge aux champignons, insectes et autres animaux, tout en restituant des éléments nutritifs au sol. Nous suggérons qu'entre ces deux pôles, il existe une tension qui exige d'être gérée avec soin.

D'un autre côté, on voit que certains matériaux non renouvelables, le métal notamment, sont si largement recyclés que certains fournisseurs envisagent qu'à l'avenir la majorité des matières premières seront issues du recyclage. Les matières plastiques occupent une place à part dans ce contexte, car elles peuvent provenir de matières premières non-renouvelables ou renouvelables. Les volumes de production de plastique devraient augmenter fortement au cours des prochaines années. Comment, de façon réaliste, il sera possible de répondre à cette demande accrue avec des matières plastiques recyclées et renouvelables ?

D'autres matériaux sont considérés comme « abondants » même s'ils ne sont pas renouvelables (le sable par ex.). Le type

de sable nécessaire à la production du verre et des céramiques (porcelaine, grès), et utilisé massivement pour fabriquer le ciment destiné à l'industrie mondiale du bâtiment, provient essentiellement du lit des rivières et des plages. Il résulte de l'érosion progressive de roches sédimentaires par le vent et l'eau de pluie, qui se décomposent en grains de sable et sont emportés par les cours d'eau du monde entier. Ainsi, bien qu'étant techniquement non renouvelable, le sable se reconstitue au fil du temps. Cependant, le rythme des extractions de sable est tel qu'il excède le temps nécessaire à sa formation, ce qui constitue une menace pour les rivières, les plages, voire même pour des côtes et des îles entières.

Il existe des certifications pour garantir l'extraction responsable de nombreuses matières premières. Demandez toujours à vos fournisseurs de confirmer l'origine de leurs matières premières et les certifications qui s'y appliquent.

Matériaux et toxicité

La toxicité est un sujet complexe, qui affecte toutes les étapes de la production des matériaux. Des matières premières et des ingrédients chimiques toxiques entrent dans la production de plastiques et de textiles synthétiques, mais cela ne signifie pas nécessairement que le matériau fini soit toxique. D'autres matériaux génèrent des déchets toxiques lors de leur élaboration, par exemple, les résidus miniers liés à l'extraction des métaux et des matières premières des céramiques. Dans d'autres cas, des matières toxiques sont utilisées pour le raffinage et le traitement des matières premières, comme le chlore pour blanchir les fibres du papier, ou le disulfure de carbone pour produire les fibres de viscose. De même, le plomb et le cadmium servaient autrefois couramment pour le glaçage des céramiques.

Les produits évoqués ci-dessus sont en général l'objet de restrictions et de contrôles très stricts, ou bien sont remplacés par des équivalents non toxiques. Pourtant, l'histoire n'est pas avare de catastrophes industrielles provoquées par ceux-ci, aux conséquences dévastatrices pour la main-d'œuvre, les populations locales et les

écosystèmes. Cet ouvrage répertorie les options moins toxiques ou non toxiques pertinentes pour chaque matériau ou catégorie de matériaux.

Pour les consommateurs, c'est sans doute le bon usage des matériaux qui joue un rôle central. De nombreux matériaux sont considérés comme sans danger tant qu'ils ne dépassent pas un certain seuil de température ou qu'ils n'entrent pas en contact avec certaines substances, comme l'eau ou certains produits chimiques. L'approbation des produits par la *Food and Drug Administration* (FDA) aux États-Unis et la législation européenne équivalente donnent des directives élémentaires d'utilisation, mais en réalité, on connaît très mal les effets des combinaisons complexes de produits chimiques utilisés dans la production des matériaux. À ce titre, les additifs utilisés dans les matières plastiques sont souvent pointés du doigt ; si la toxicité de certains d'entre eux, comme les bromures utilisés pour la résistance au feu et les phtalates servant à assouplir les PVC, est bien comprise, nos connaissances restent lacunaires. Une étude pionnière, publiée en 2019 par une équipe de scientifiques allemands et norvégiens dans *Environmental Science & Technology*, analyse divers échantillons d'emballages et de produits issus de huit types de plastique courants. L'étude révèle que, si certains plastiques sont peu ou pas toxiques, d'autres recèlent plusieurs composés toxiques encore inconnus ou non répertoriés. Ce résultat est préoccupant pour le recyclage des plastiques, car les procédés actuels ne permettent pas d'isoler les additifs potentiellement nocifs des matériaux plastiques récupérés. Une bonne pratique au départ consiste à vérifier que tous les matériaux, additifs et finitions que l'on prévoit d'utiliser sont conformes aux règlements européens REACH (enregistrement, évaluation, autorisation et restriction des substances chimiques) et SVHC (substances extrêmement préoccupantes). Dans ce livre, j'évite les matériaux ayant des effets toxiques connus ; je conseille de limiter additifs et traitements de surface au strict minimum, pour se protéger des effets combinés : dans l'état

actuel de nos connaissances, la toxicité est difficile à prévoir.

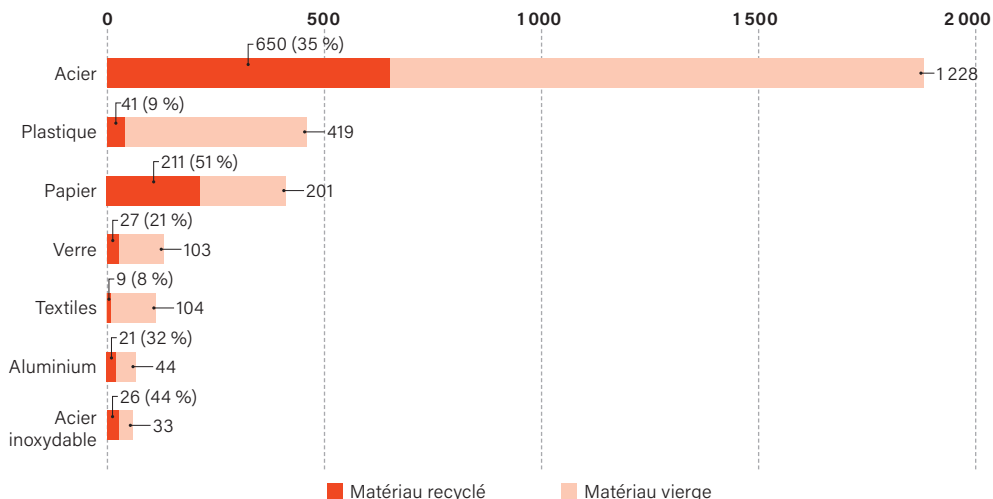
Retour à la circularité

Même s'il n'y paraît plus du tout aujourd'hui, ce que nous appelons circularité était autrefois la règle et non l'exception. De nos jours, le système économique, les infrastructures et les solutions techniques en place permettent des volumes de productions auparavant inconcevables, dont seule une infime partie est récupérée et recyclée, compostée ou réintroduite dans le circuit. Ces conditions radicalement nouvelles contrastent avec un passé où les ressources étaient plus rares. En un sens, la recherche d'une économie plus circulaire constitue un retour en arrière, à l'époque où « réduire, réutiliser, recycler » était la norme, et non un slogan. En même temps, il serait illusoire de chercher à résoudre la crise environnementale en obligeant les habitants de la planète à revenir aux modes de vie qui prévalaient avant la révolution industrielle.

Cet ouvrage présente plusieurs stratégies de récupération des déchets et de circularité des matériaux, et les options possibles sont très variables selon leurs types. Un bon exemple est le recyclage. Avec les procédés actuels, certains matériaux sont plus faciles à recycler que d'autres, ce qui transparaît clairement dans les différences de taux de recyclage entre les catégories de matériaux – parfois même d'un matériau à l'autre, voire d'une qualité de matériau à l'autre. En outre, le recyclage est en soi un sujet complexe. Qu'entend-on exactement par « matériau recyclé » ? S'agit-il de déchets post-industriels (PIR) d'usine recyclés, parfois collectés dans les ateliers et réintégrés directement dans la production, ou bien de déchets recyclés après consommation (PCR) qui ont circulé un peu partout, avant d'être récupérés, triés et recyclés en de nouveaux matériaux ? Le premier cas est généralement beaucoup plus simple que le second ; c'est pourquoi, lorsque l'on évalue les avantages du recyclage pour l'environnement, il faut distinguer entre matériaux PIR et PCR. D'un autre côté, il existe de nombreux déchets PIR qui sont loin d'être faciles à recycler, en particulier les déchets miniers, pour lesquels le recyclage serait extrêmement utile et opportuniste.

Taux de recyclage des matériaux au niveau mondial.

Proportion de matériaux recyclés (PIR et PCR) utilisés pour la production de nouveaux matériaux, en millions de tonnes¹. Remarque particulière pour les textiles : on estime qu'à l'heure actuelle, la quasi-totalité des textiles recyclés sont en polyester issu de bouteilles plastiques en PET récupérées.



Autre élément à prendre en compte : la qualité du matériau recyclé. Un recyclage efficace passe par une séparation des matériaux, mais bien souvent, il faut aller plus loin et trier chaque matériau par type et par qualité. L'aluminium en est un bon exemple : si le recyclage mélange différents alliages, le matériau obtenu sera de qualité inférieure. Il en va de même pour les plastiques : de nombreux produits d'emballage contiennent des combinaisons de substances qui rendent impossible le recyclage en un nouveau matériau aux propriétés équivalentes qui pourra entrer dans des produits d'emballage. S'il est vrai que les entreprises de traitement et de recyclage assurent un tri, pour que le système fonctionne efficacement, il faut que les ménages, les institutions et les entreprises fassent aussi leur part du travail. C'est plus facile à dire qu'à faire, car on ne dispose pour l'instant d'aucun système d'étiquetage universel. Beaucoup de gens connaissent les codes de recyclage que l'on voit parfois sur les produits et les emballages, mais leur mise en œuvre est inégale, et pour les profanes, le système est sans doute trop technique, manquant d'indications claires sur la bonne manière de

trier les déchets. Afin d'aider les consommateurs à trier correctement leurs déchets, certains pays, notamment le Danemark, ont instauré un système d'étiquetage, visible sur les produits, sur les bacs de recyclage et dans les centres de tri. Cet ouvrage propose une introduction au recyclage pour chaque type de matériau, ainsi que des stratégies de conception visant à améliorer la circularité.

Outre le recyclage, les matériaux biodégradables offrent une solution alternative à la fin de la vie d'un produit. Certaines matières, comme le papier, sont à la fois biodégradables et largement recyclées, combinant les avantages des deux. Il y a toutefois certaines choses à savoir concernant les matériaux biodégradables. D'abord, on l'ignore trop souvent, biodégradable n'est pas synonyme de compostable. « Biodégradable » signifie simplement qu'un matériau peut se dégrader sans effets négatifs sur l'environnement ; une matière est dite « compostable » si elle contient des nutriments et éléments qui enrichissent le sol, devenant ainsi un engrais au cours du compostage. D'autre part, d'un

matériau à l'autre, les conditions nécessaires à la décomposition peuvent être extrêmement variables. Certains nécessitent un apport d'oxygène et des températures élevées dans un composteur industriel, tandis que d'autres se décomposent dans un compost domestique, voire en décharge. Sur les matériaux concernés, les entrées de ce livre proposent une synthèse des certifications et des exigences en la matière. En un mot, on devra toujours aborder avec prudence la question des matériaux biodégradables. Les déchets biodégradables risquent de provoquer les mêmes dommages environnementaux que n'importe quel type de déchets jusqu'à leur décomposition complète, ce qui, selon les conditions climatiques, peut prendre beaucoup de temps. C'est pourquoi il faut éviter de vanter les produits biodégradables en laissant entendre aux consommateurs que le rejet sauvage de déchets est plus ou moins acceptable. Les organismes les plus sérieux, notamment TÜV Austria, filtrent rigoureusement les demandes pour éviter d'accorder une certification à des produits qui ne sont pas biodégradables ou qui risquent d'être perçus comme un encouragement à jeter des ordures de manière irresponsable.

Un design qui privilégie la longévité

Aucun matériau n'est parfait ; chacun a ses inconvénients, que le designer s'efforce d'atténuer en adaptant ses plans, en combinant plusieurs matériaux, ou en utilisant un revêtement ou un traitement de surface pour répondre à des besoins fonctionnels spécifiques. Si à cela on ajoute la durabilité, les choses deviennent vite inextricables. Comme on l'a dit, de nombreuses associations courantes de matériaux, traitements de surface et techniques d'assemblage sont difficiles à séparer, rendant tout recyclage difficile, voire impossible. À l'inverse, des matériaux moins robustes peuvent avoir des effets très négatifs dans certaines applications, car on aura tendance à utiliser trop de matériau pour compenser des performances moindres.

Il ne faut pas oublier que les matériaux recyclés ont souvent des performances inférieures à celles des matériaux vierges : en conséquence, si l'on veut utiliser des matières recyclées plutôt

que des vierges, il est nécessaire d'adapter le design du produit. Cela suppose par exemple de prévoir des parois plus épaisses ou d'ajouter des nervures de renforcement sur les moulages en plastique, ou encore de choisir un grammage plus fort si l'on utilise du papier recyclé.

Nous indiquons les principales qualités mécaniques et de résistance à l'environnement de chaque matériau, avec une synthèse de ses forces et de ses faiblesses. Le livre indique aussi les solutions spécifiques proposées de plus en plus fréquemment pour améliorer les propriétés des matériaux sans nuire à leur circularité.

L'esthétique de la durabilité

On a trop tendance à oublier que les matériaux durables sont souvent peu esthétiques. Cet aspect peut être lié aux processus de recyclage, comme pour les plastiques, où la séparation par couleur est encore assez rare ; les recycleurs se contentent en général d'ajouter un pigment noir ou gris foncé pour donner au matériau recyclé une couleur homogène. Mais tout comme les principes de design visant à améliorer la circularité risquent parfois de nuire à l'aspect esthétique, de même les apprêts décoratifs, certains apprêts ou traitements fonctionnels, risquent de nuire à la circularité des matériaux. Bien entendu, c'est aussi l'occasion d'explorer de nouvelles potentialités expressives des matériaux et de nouvelles expériences utilisateur. Une synthèse des considérations esthétiques pertinentes et des processus de finition compatibles est fournie.

Comment utiliser ce livre

J'espère avant tout que ce livre sera un outil de référence, qui vous aidera à identifier les moyens de réduire l'empreinte environnementale des matériaux que vous spécifiez en tant que designer. J'espère aussi qu'il vous aidera à découvrir d'autres matériaux et fournisseurs que ceux dont la liste est fournie dans cet ouvrage. En sachant à peu près où chercher, vous mènerez des recherches plus rapides et mieux ciblées que si vous commenciez simplement par un terme générique comme « plastiques durables ».

Chaque chapitre comprend quelques



Détail de la Chaise S-1500 conçue par Snøhetta pour NCP (voir p. 129). Au sujet de l'aspect esthétique de la durabilité, les variations de couleur des déchets de plastique recyclés utilisés dans la chaise sont clairement visibles sur le produit fini.

fournisseurs, que vous pouvez contacter pour commencer votre recherche des matériaux adéquats. Je tiens à souligner que j'ai sélectionné les fournisseurs en fonction de leur volonté de transparence concernant l'impact environnemental de leurs matériaux, et de mon opinion personnelle sur leur excellence dans leurs domaines respectifs. Aucun des fournisseurs n'a payé pour figurer dans le livre, et j'ai utilisé les informations qu'ils m'ont fournies en toute bonne foi, en supposant qu'elles étaient complètes et exactes. Les fautes de frappe, les interprétations erronées et autres erreurs sont bien entendu de mon seul fait. Veuillez donc à effectuer un suivi et à faire preuve de prudence avant d'établir une quelconque relation commerciale avec les fournisseurs mentionnés dans ce livre.

Pour ce qui est des fournisseurs, des statistiques et des études de cas, il est vrai que ce livre est nettement centré sur l'Europe. Ceci ne vient pas d'une décision délibérée de ma part – j'ai plutôt l'impression que les nombreux fournisseurs et études de cas européens présentés ici résultent eux-mêmes de

la nouvelle législation en matière de durabilité et du *Green Deal* lancé par la Commission européenne, qui oblige les fournisseurs de matériaux et les marques à prendre en compte les matériaux durables bien davantage que ce qui se fait sur d'autres marchés. L'UE est également une mine de statistiques et de données, à la fois grâce à Eurostat, l'agence officielle de statistiques de l'UE, mais aussi par le biais des très nombreux rapports de grande qualité sur tous les sujets, de la gestion des déchets aux avantages des matières premières renouvelables, qui sont le fruit de projets menés par l'UE et par diverses organisations commerciales et institutions universitaires.

Enfin, chaque chapitre présente un entretien avec un designer, un chercheur ou un entrepreneur dont le travail redéfinit le design durable dans son domaine. Si l'objectif principal de cet ouvrage est de dresser un inventaire des matériaux actuellement disponibles, ces entretiens vous ouvriront à d'autres points de vue et vous donneront une idée de la manière dont les technologies des matériaux durables pourraient évoluer à l'avenir.

1

Matières plastiques

Plastiques. Par où commencer ? D'une part, les plastiques semblent être l'image même de la production non durable et de l'utilisation de ressources non renouvelables ; d'autre part, il est quasiment impossible d'imaginer le monde moderne sans cette famille de matériaux extrêmement utiles. Depuis que la production de masse de plastiques a commencé pour de bon au début du xx^e siècle, le monde a connu une croissance fulgurante des produits en plastique et, par conséquent, une croissance fulgurante des déchets plastiques. Selon le rapport 2022 *Global Plastic Outlook* de l'OCDE, quelque 460 millions de tonnes de plastique ont été produites en 2019, et ce chiffre devrait atteindre 1 230 millions de tonnes d'ici 2060. Compte tenu de la montagne de déchets plastiques que nous semblons incapables de traiter aujourd'hui, l'avenir s'annonce plutôt sombre. Selon un autre rapport publié en 2016, l'industrie du plastique représentait environ 1 % des émissions mondiales de CO₂ en 2014, chiffre qui devrait atteindre 15 % d'ici à 2050. Ces chiffres mettent en évidence deux stratégies potentielles pour faire face à l'impact environnemental des plastiques : améliorer le recyclage pour traiter les déchets plastiques, et recourir aux matières premières renouvelables pour faire face à l'augmentation des émissions de l'industrie du plastique. La plupart des plastiques utilisés aujourd'hui sont dérivés de produits pétrochimiques – sous forme de pétrole brut raffiné ou de gaz naturel. Ces matières premières sont ensuite transformées pour en extraire des monomères, les éléments moléculaires constitutifs des plastiques. Divers procédés sont ensuite appliqués à ces monomères pour déclencher une réaction en chaîne appelée polymérisation, formant les longues chaînes de molécules qui constituent un polymère (qui n'est qu'un autre mot pour désigner le plastique). La complexité de ces procédés joue un rôle important dans l'intensité énergétique nécessaire à la production des plastiques et, par conséquent, dans les émissions générées. Les plastiques qui nécessitent moins de transformations et moins d'étapes de fabrication génèrent moins d'émissions et utilisent moins de ressources que ceux qui font appel à des procédés plus complexes. Plastics Europe est une association commerciale de fabricants de matières plastiques, et son ensemble d'« éco-profil » (disponible sur [plasticseurope.org](https://www.plasticseurope.org)) fournit une excellente vue d'ensemble de certains des procédés de fabrication de matières plastiques les plus courants et de leur impact sur l'environnement.

Les plastiques – arbre généalogique

Vue d'ensemble des matières plastiques présentées dans ce chapitre.

Thermoplastiques rigides

Matériaux thermoplastiques utilisés dans les pièces plastiques moulées rigides et les films souples.

- PP (p. 28, 54)
- PE (p. 30, 56)
- PLA (p. 58)
- AC (p. 60)
- PET (p. 32)
- ABS (p. 34)
- PA (p. 38, 64)
- PC (p. 36, 62)

Élastomères thermoplastiques (TPE)

Les TPE sont des mélanges de thermoplastiques rigides et d'élastomères, ce qui leur confère des propriétés souples et flexibles (p. 40 à 68).

- TPU
- TPS
- TPA
- PTC

Thermoplastiques

Ces plastiques, qui deviennent souples lorsqu'ils sont chauffés, puis durcissent à nouveau en refroidissant, sont bien adaptés aux procédés courants de production de masse, notamment le moulage par injection, l'extrusion et le moulage par soufflage.

Thermodurcissables rigides

Les thermodurcissables rigides comptent parmi les plastiques les plus solides et les plus résistants en température.

- LER (p. 66)

Élastomères thermodurcissables

Matériaux de type caoutchouc souples et flexibles.

- Caoutchouc de silicone (p. 42)
- Caoutchouc naturel (p. 44, 70)

Thermodurcissables

Plastiques qui ne peuvent plus être retraités une fois qu'ils ont été mis en forme. Ils sont en général formés par coulage ou moulage par compression, puis figés (« durcis ») à l'aide de divers types de catalyseurs : réaction chimique, rayonnement UV ou chaleur.

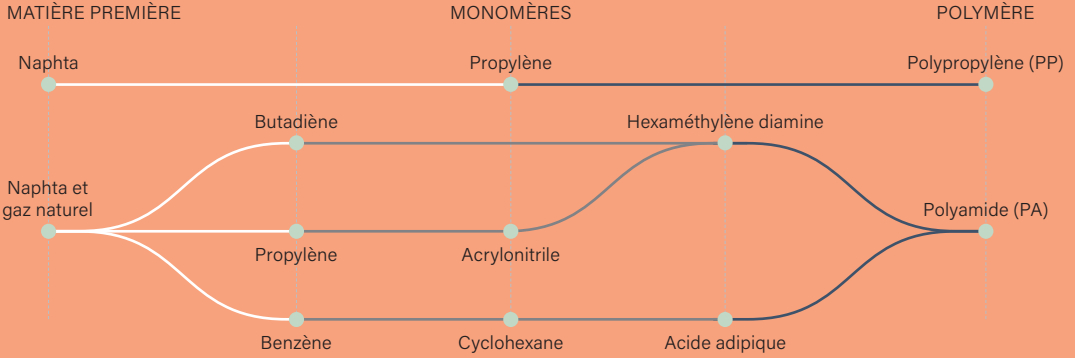
Matières plastiques

La quasi-totalité des matières plastiques couramment utilisées aujourd'hui se classent en deux catégories : les thermoplastiques et les thermodurcissables. Les thermoplastiques constituent le groupe le plus important. Ils sont généralement fournis sous forme de granulés afin de pouvoir être facilement transformés traités par des procédés rapides et à grand volume : moulage par injection, moulage par soufflage ou extrusion. Les matériaux thermoplastiques peuvent être mis en forme plusieurs fois, et peuvent donc être recyclés : pour cela, il suffit de broyer les déchets, les réchauffer et les mettre en forme pour produire de nouvelles pièces. À l'inverse, les plastiques thermodurcissables se présentent en général sous la forme d'une résine liquide, qui est durcie par un catalyseur (par exemple, une réaction chimique, la chaleur ou la lumière UV) à l'aide de procédés de formage tels que le moulage et l'autoclavage. Une fois formées, les résines thermodurcissables ne peuvent plus être chauffées et retraitées. Les plastiques thermodurcissables ne sont donc pas facilement recyclables selon les mêmes procédés que les thermoplastiques. (Le diagramme en p. 17 donne un aperçu des matériaux thermoplastiques et thermodurcissables.)

On ajoute aux plastiques une multitude d'additifs pour leur donner une couleur ou obtenir d'autres effets esthétiques, ou encore pour améliorer les performances fonctionnelles – propriétés mécaniques renforcées, résistance aux intempéries ou au feu, etc. Certains de ces additifs ont un impact négatif bien connu, comme les produits ignifuges bromés, les substances perfluorées utilisés pour rendre les surfaces résistantes aux graisses et imperméables et les phtalates servant à assouplir le PVC. Pour minimiser l'utilisation d'ingrédients nocifs, interrogez toujours vos fournisseurs sur leur conformité au règlement REACH (Enregistrement, Évaluation, Autorisation et Restriction des substances Chimiques), en vigueur dans l'Union européenne depuis 2007, ainsi qu'à la Directive relative à la limitation des substances dangereuses (RoHS), une autre réglementation de l'UE concernant spécifiquement les produits électroniques. Pourtant, il n'est pas certain que ces mesures d'identification des additifs et ingrédients potentiellement nocifs contenus dans les plastiques soient suffisantes. Des organismes indépendants tels que l'International Pollutants Elimination Network, ou IPEN (réseau international pour l'élimination des polluants), ONG basée à Stockholm, publient régulièrement des rapports et des résultats d'études sur les plastiques et leur toxicité. Les recherches dans ce domaine sont encore largement insuffisantes, mais certaines ressources en ligne fournissent des informations sur les produits chimiques et leurs ingrédients, comme le site web de l'Agence européenne des produits chimiques (ECHA) et celui de son homologue aux États-Unis, le Chemical Abstracts Service (CAS).

Les éléments constitutifs des plastiques

Les ingrédients et les étapes de fabrication sont très variables d'un plastique à l'autre, ce qui affecte directement l'impact environnemental du matériau. L'aperçu simplifié ci-dessous donne deux exemples : le polypropylène (PP), un plastique dit « de base » relativement simple à produire, et le polyamide (PA), un plastique technique qui implique plusieurs étapes supplémentaires.

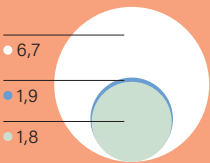


Potentiel de réchauffement global : plastiques de base et plastiques techniques

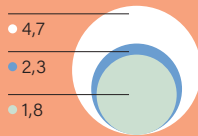
Comme on l'a dit, les plastiques de base sont en général assez simples à produire, tandis que les plastiques techniques, plus complexes à fabriquer, offrent de meilleures performances et une meilleure résistance à la température. Comme le montrent ces exemples tirés des deux catégories, la complexité du processus de fabrication a un impact direct sur le potentiel de réchauffement global (PRG) du matériau obtenu.

PLASTIQUES TECHNIQUES (kg CO₂eq/kg)

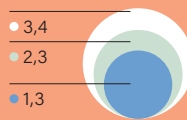
PA (p. 38, 64)



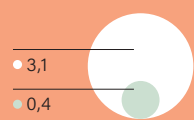
TPE (p. 40, 68)



PC (p. 36, 62)



ABS (p. 34)

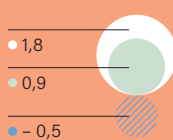


PLASTIQUES DE BASE (kg CO₂eq/kg)

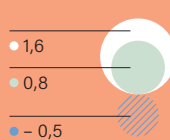
PET (p. 32)



PE (p. 30, 56)



PP (p. 28, 54)



● PP vierge pétrosourcé ● Recyclé ● Verge renouvelable ● Hachuré = PRG négatif