

UN APPRENTISSAGE FACILE

Une édition spéciale de PTC

Durabilité des produits

pour
les nuls[®]
A Wiley Brand



Concevez des
produits à empreinte
carbone réduite

Optimisez vos processus
de fabrication

Assurez un service
et une circularité
rentables

Avec les
compliments de



ptc[®]

Dave Duncan

À propos de PTC

Des avions aux dispositifs médicaux, en passant par les éoliennes et les ordinateurs, les solutions logicielles de PTC offrent aux entreprises une approche inédite pour repenser la conception, la fabrication et la maintenance de leurs produits.

Leader mondial de la gestion du cycle de vie des produits, PTC propose des logiciels capables de centraliser les données à chaque étape du cycle de vie. Cette approche permet de mieux maîtriser la complexité des produits, tout en renforçant l'excellence en étude et en conception, la performance industrielle et logistique, ainsi que l'efficacité des opérations et des services.

Des entreprises de toutes tailles font confiance à PTC pour la richesse de son portefeuille technologique, la solidité de son réseau de partenaires et l'étendue de son expertise industrielle. Ses solutions couvrent l'ensemble du cycle de vie des produits et incluent divers logiciels de pointe pour la gestion du cycle de vie des produits (PLM), la gestion du cycle de vie des applications (ALM), la conception assistée par ordinateur (CAO) et la gestion du cycle de vie des services (SLM).

PTC compte plus de 30 000 clients, dont les plus grands noms et innovateurs des principaux secteurs industriels, comme l'automobile, l'aérospatiale et la défense, les machines industrielles, les technologies médicales, l'électronique de pointe et la haute technologie. PTC s'engage pleinement auprès de ses clients et travaille main dans la main avec eux pour les guider tout au long de leur transformation digitale.

Chez PTC, nous ne nous contentons pas de rêver d'un monde meilleur. Nous nous engageons activement à le bâtir. Nos valeurs, nos démarches environnementales, notre engagement social et nos solutions logicielles témoignent pleinement de cette ambition.



Durabilité des produits

Une édition spéciale de PTC

par Dave Duncan

^{pour}
les nuls[®]
A **Wiley** Brand

Durabilité des produits pour les Nuls®, édition spéciale de PTC

Publié par

John Wiley & Sons, Inc.

111 River St., Hoboken, NJ 07030-5774

www.wiley.com

Copyright © 2025 de John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. Tous les droits sont réservés, y compris ceux relatifs à l'exploration de textes et de données, à l'entraînement de l'IA et aux technologies similaires.

Aucune partie de cet ouvrage ne peut être reproduite, conservée dans un système d'extraction, ou transmise sous quelque forme ou par quelque moyen que ce soit, par voie électronique ou mécanique, photocopie, enregistrement, numérisation ou autre, sans l'accord écrit préalable de l'éditeur, sauf si les articles 107 et 108 de la loi des États-Unis de 1976 relative au droit d'auteur (« United States Copyright Act ») l'autorisent.

Les demandes d'autorisation adressées à l'éditeur doivent être envoyées au Service des autorisations, John Wiley & Sons, Inc. 111 River Street, Hoboken, NJ 07030, (201) 748-6011, fax (201) 748-6008, ou en ligne à <http://www.wiley.com/go/permissions>.

Marques commerciales : Wiley, Pour les Nuls, le logo Dummies Man, The Dummies Way, Dummies.com, Avec les Nuls, tout devient facile !, et les appellations commerciales afférentes sont des marques de commerce ou des marques déposées de John Wiley & Sons, Inc. et/ou de ses sociétés affiliées aux États-Unis et dans d'autres pays, et ne peuvent pas être utilisées sans autorisation écrite. PTC et le logo PTC sont des marques déposées de PTC. Toutes les autres marques de commerce appartiennent à leurs propriétaires respectifs. John Wiley & Sons, Inc. n'est associé à aucun produit ou distributeur mentionné dans cet ouvrage.

LIMITATION DE RESPONSABILITÉ / EXCLUSION DE GARANTIE : L'ÉDITEUR ET L'AUTEUR NE FONT AUCUNE DÉCLARATION NI N'ACCORDENT AUCUNE GARANTIE QUANT À L'EXACTITUDE OU À L'EXHAUSTIVITÉ DU CONTENU DU PRÉSENT LIVRE ; EN PARTICULIER, ILS DÉCLINENT SPÉCIFIQUEMENT TOUTES LES GARANTIES, Y COMPRIS, SANS RESTRICTION, LES GARANTIES D'ADÉQUATION À UN USAGE PARTICULIER. AUCUNE GARANTIE NE PEUT ÊTRE CRÉÉE OU PROROGÉE PAR DES DOCUMENTS DE VENTE OU DE PROMOTION. LES CONSEILS ET STRATÉGIES CONTENUS DANS CET OUVRAGE PEUVENT NE PAS CONVENIR À TOUTES LES SITUATIONS. LES INFORMATIONS COMMUNIQUÉES LE SONT EXCLUSIVEMENT À TITRE INDICATIF ET NE SAURAIENT EN AUCUN CAS ÊTRE INTERPRÉTÉES COMME CONSTITUANT UN CONSEIL DE NATURE FISCALE, JURIDIQUE OU RELATIF AUX PRESTATIONS SOCIALES. CET OUVRAGE EST COMMERCIALISÉ EN TENANT COMPTE DU FAIT QUE L'ÉDITEUR N'EST PAS CHARGÉ DE FOURNIR DES SERVICES JURIDIQUES, COMPTABLES OU AUTRES SERVICES PROFESSIONNELS. LES LECTEURS QUI SOUHAITENT OBTENIR UNE ASSISTANCE PROFESSIONNELLE DOIVENT S'ADRESSER À UN PROFESSIONNEL COMPÉTENT. NI L'ÉDITEUR NI L'AUTEUR NE SERONT TENUS RESPONSABLES DES DOMMAGES DÉCOULANT DU CONTENU DU PRÉSENT OUVRAGE. LA MENTION D'UNE ORGANISATION OU D'UN SITE INTERNET DANS LE PRÉSENT OUVRAGE, EN CITATION ET/OU COMME SOURCE POTENTIELLE DE RENSEIGNEMENTS SUPPLÉMENTAIRES, NE SIGNIFIE PAS QUE L'AUTEUR OU L'ÉDITEUR ENTERME LES INFORMATIONS OU LES RECOMMANDATIONS QUE PEUT FOURNIR L'ORGANISATION OU LE SITE INTERNET. EN OUTRE, LES LECTEURS DOIVENT SAVOIR QUE LES SITES INTERNET MENTIONNÉS DANS LE PRÉSENT OUVRAGE PEUVENT AVOIR CHANGÉ OU DISPARU ENTRE LE MOMENT OÙ L'OUVRAGE A ÉTÉ RÉDIGÉ ET CELUI OÙ IL EST LU.

Pour obtenir des renseignements généraux sur nos autres produits et services, ou sur la publication d'un livre pour les Nuls destiné à votre entreprise ou organisation, veuillez contacter notre service de développement commercial aux États-Unis, par téléphone au 877-409-4177, par e-mail à info@dummies.biz, ou consulter notre site www.wiley.com/go/custompub. Pour obtenir des informations sur les licences de la marque pour les Nuls pour des produits ou services, veuillez contacter BrandedRights&Licenses@Wiley.com.

ISBN: 978-1-394-36822-8 (pbk) ; ISBN: 978-1-394-36825-9 (ebk) ; ISBN: 978-1-394-36827-3 (ePub). Certaines pages blanches de la version imprimée peuvent ne pas figurer dans la version ePub.

Remerciements de l'éditeur

Cet ouvrage a été réalisé avec la participation des personnes suivantes :

Rédacteur chargé du développement et du projet :
Carrie Burchfield-Leighton

Responsable éditorial : Rev Mengle

Rédacteur chargé des acquisitions : Traci Martin

Responsable de compte client : Matt Cox

Auteurs de PTC ayant contribué à cet ouvrage :

Elena Angst, Sean McGrath,
Ashley Pruitt, Nicole Dwyer,
James Norman,
Kristen Wells Griffith et
Brad Donegan

Éditeur de la production :
Magesh Elangovan

Table des matières

INTRODUCTION	1
À propos de ce livre	2
Quelques suppositions idiotes	2
Icônes employées dans ce livre	3
Au-delà de ce livre	4
CHAPITRE 1 : Mise à niveau de la durabilité des produits	5
Définir la durabilité	5
Nos produits ont un impact négatif sur l'environnement	7
La conformité : une discipline imposée	8
La rentabilité : une récompense attrayante	9
Réduction de l'empreinte des produits grâce à la refonte du cycle de vie	10
CHAPITRE 2 : Résolution des problèmes liés à l'écologie et à la conformité	11
Identification du problème	11
Les neuf limites planétaires	12
Décarbonation	13
Préservation des ressources limitées	14
Réglementation des problèmes	16
Déclarations de performance environnementale	17
Réglementations relatives aux matières dangereuses	17
Réglementation en matière de décarbonation	18
Réglementation en matière de circularité	21
CHAPITRE 3 : Alignement de la durabilité et de la valeur commerciale	23
Valeur de la décarbonation	24
Réduire la quantité de matériaux dans la conception des pièces	25
Dématérialiser grâce aux logiciels embarqués	26
Améliorer les données et la sélection des fournisseurs	27
Trouver un équilibre dans les critères de sélection des matériaux	27
Répartir la fabrication	28
Tester la fabricabilité	29
Automatiser les EPD	29
Valeur de la circularité	30
Conception modulaire	31
Envoyer des techniciens en dernier recours	32
Commander des pièces de rechange en dernier recours	33
Différenciation des produits en termes d'empreinte écologique	34

CHAPITRE 4 :	Principes d'éco-conception	35
	Importance de l'éco-conception dans le cycle de vie	35
	La quête d'une éco-conception responsable	35
	Cadre d'éco-conception pour les sous-traitants en fabrication	37
	Niveau des pièces.....	37
	Niveau des produits.....	38
	Niveau du système de service produit.....	39
	Gestion du séquençage de l'éco-conception dans le monde réel	40
CHAPITRE 5 :	Gestion de l'empreinte écologique grâce à une approche axée sur la totalité du cycle de vie	41
	Lignes directrices relatives à l'approche du cycle de vie	42
	Priorités en matière d'inventaire du cycle de vie	43
	Empreinte opérationnelle.....	44
	Empreinte carbone en amont.....	45
	Empreinte carbone en aval	46
	Circularité	47
	La continuité numérique du cycle de vie	48
	Centre technique	49
	Centre d'actifs.....	50
	Intégration de la nomenclature PLM et du centre d'actifs	51
	Directives spécifiques à la configuration	51
	Prévisions basées sur l'équipement	51
	Conception et services basés sur les données	52
	Valeur boostée par l'IA.....	52
CHAPITRE 6 :	Dix conseils pour réduire votre empreinte écologique tout au long du cycle de vie des produits et améliorer votre rentabilité	53
	Pensez à la totalité du cycle de vie	53
	Privilégiez la circularité grâce à du matériel et à des logiciels modulaires	54
	N'oubliez pas les techniciens de première ligne.....	54
	Considérez votre EPD comme une fonction d'une nomenclature bien remplie.....	55
	Considérez les avantages du DPP	55
	Agissez dès maintenant pour réduire votre empreinte carbone et satisfaire votre directeur financier	56
	Envisagez de prendre l'initiative sur des sujets cruciaux pour la marque	56
	Développez une intuition de la valeur carbone.....	57
	Développez une intuition de la circularité	58
	Utilisez l'objectif de durabilité pour établir votre continuité numérique	59

Introduction

Des produits de meilleure qualité, plus écologiques et plus rentables : il est grand temps d'aller au-delà des belles paroles sur la durabilité et de confier cette mission aux véritables acteurs du changement, comme vous, qui êtes au cœur de la conception, de la fabrication, de la maintenance et du recyclage des produits. L'impact environnemental ne diminuera pas sans votre intervention. Et puisque près de 80 % de l'empreinte carbone d'un produit est déterminée dès sa phase de conception (y compris la fabrication et la planification des services), vous êtes les véritables champions en mesure d'allier écologie et rentabilité.

La *durabilité* reste un domaine relativement nouveau pour beaucoup d'entre nous et qui évolue rapidement. Et il est tout à fait normal de ne pas tout maîtriser. Pas de panique ! Ce livre vous donnera les clés pour dialoguer d'égal à égal avec les experts en la matière. D'ailleurs, vous verrez que les spécialistes de la durabilité sont des gens très ouverts et accessibles.

Prenez l'exemple du sport à l'université. Intégrer l'équipe de football n'est pas l'option la plus évidente, car la majorité des joueurs s'y sont mis dès leur plus jeune âge. En revanche, l'Ultimate Frisbee est un sport où presque tout le monde débute au même niveau, ce qui permet de s'intégrer facilement et d'être rapidement utile à son équipe.

La durabilité des produits, c'est un peu l'Ultimate Frisbee. Il suffit de maîtriser quelques règles de base pour se lancer. Tout au long de cet ouvrage, j'insiste sur trois points principaux qui me semblent essentiels :

- » **Réduire durablement l'empreinte écologique d'un produit n'a de sens que si cette démarche est rentable.** Vous pourrez sans doute diminuer d'au moins 50 % l'empreinte carbone de vos produits d'ici 5 à 10 ans en adoptant des solutions qui s'avéreront de toute façon bénéfiques financièrement. Ne vous inquiétez pas pour le reste. De nouvelles technologies prometteuses sont en cours de développement et seront disponibles dans les années 2030 pour vous aider à gérer efficacement le reste de vos émissions.
- » **Mieux vaut laisser la politique de côté.** Les opinions politiques évoluent. En revanche, le progrès technologique suit une voie bien définie : il nous apporte des produits de meilleure qualité, plus abordables et plus respectueux de l'environnement. Tout le monde s'accorde à reconnaître les avantages de cette progression, que ce soit pour la durabilité, les économies d'énergie ou la solidité des chaînes

logistiques, et ce, quelles que soient nos opinions ou notre sensibilité politique.

- » **Nul besoin de changer radicalement vos méthodes de travail pour le moment.** David Genter, ancien directeur de conception des systèmes, fait remarquer que les spécialistes du cycle de vie des produits jonglent déjà avec différents aspects de la qualité pour optimiser les coûts (performance, fonctionnalités, fiabilité, conformité, durabilité, facilité d'entretien, esthétique et qualité perçue). Il suffit d'ajouter une nouvelle dimension : la durabilité.

Prenons maintenant notre frisbee d'occasion, sans PFAS et 100 % recyclable, et lançons-nous !

À propos de ce livre

Ce livre comporte six chapitres qui explorent les thèmes suivants :

- » Mise à niveau de la durabilité des produits pour mieux cerner les enjeux et identifier les aspects prioritaires à traiter
- » Problèmes causés par nos produits et le cadre juridique qui encourage la réduction de l'empreinte carbone
- » Justification pour aligner la réduction de l'empreinte carbone sur les priorités financières
- » Principes d'éco-conception (DfS, Design for Sustainability)
- » Gestion de l'empreinte carbone en tenant compte de l'ensemble du cycle de vie
- » Dix conseils pour réduire de manière rentable l'empreinte écologique des produits tout au long de leur cycle de vie

Tous les chapitres sont rédigés pour pouvoir être lus séparément. Si un thème vous attire plus spécialement, vous êtes libre de passer directement à la section qui vous intéresse. Vous pouvez lire ce livre dans l'ordre qui vous convient.

Quelques suppositions idiotes

La durabilité est un concept très large, mais quand on parle de produits durables, le sujet devient plus concret. Je me suis donc permis de faire quelques suppositions à votre égard, cher lecteur :

- » Pour commencer, vous devez comprendre ce que recouvre la durabilité dans le domaine de la fabrication discrète. On parle ici d'objets du monde réel : avions, trains, voitures, chaussures, appareils à

rayons X, grille-pain, smartphones, ascenseurs, bulldozers, valves... Bref, tout ce qui a une forme définie, une masse tangible et qui risque de faire mal si on le laisse tomber sur son pied. Le livre ne traite pas de la production par processus, une autre branche de l'industrie qui repose sur des formules ou des recettes. Elle englobe les huiles, les gaz, les produits chimiques, les aliments, la bière, les matières premières et autres substances produites en flux.

- » Deuxième point important : vous entrez probablement dans l'un de ces deux profils : soit vous travaillez sur le *cycle de vie des produits*, soit vous occupez un *poste lié à la durabilité*, ou vous en avez la *responsabilité à un niveau stratégique*. Dans le premier cas, votre expertise peut être large ou très ciblée. Le cycle de vie des produits couvre de nombreuses fonctions, comme l'étude, la planification de la fabrication, la gestion des services, l'informatique, la gestion de produits, l'approvisionnement, la conformité, et bien d'autres encore.
- » Même si vous n'occupez pas un poste lié aux produits ou à la durabilité dans le secteur de la fabrication discrète, ce livre reste une excellente porte d'entrée. Il vous permettra de comprendre comment ce secteur aborde concrètement la réduction de son empreinte carbone.

Îcônes employées dans ce livre

J'utilise parfois des icônes spéciales pour attirer l'attention sur des éléments importants tout au long du livre. Voici ce que vous trouverez :



RAPPEL

Cette icône vous rappelle les informations qu'il est important de garder à l'esprit.



CONSEIL

Vous trouverez ici des suggestions, des conseils ou des observations utiles qui vous aideront à tirer parti des expériences acquises lors d'autres implémentations.



ATTENTION

Les icônes d'avertissement sont conçues pour vous avertir et vous protéger contre les obstacles, les risques financiers et tout autre piège éventuel. Vous éviterez beaucoup de problèmes si vous portez votre attention sur ces sections du livre.



JARGON
TECHNIQUE

Cette icône peut être interprétée de deux façons : les technophiles y verront un signal pour se plonger davantage dans des détails techniques, à la fois utiles et pertinents. Les autres lecteurs pourront tranquillement passer à la suite, sans craindre de manquer quoi que ce soit d'important.

Au-delà de ce livre

Ce livre propose une bonne vue d'ensemble, mais avec seulement 64 pages, il est impossible d'approfondir véritablement tous les sujets abordés. Si vous souhaitez en savoir plus, rendez-vous sur le site PTC.com/beyond-the-book. Vous y trouverez l'ensemble des ressources complémentaires mentionnées tout au long de l'ouvrage, réunies en un seul endroit.

- » Comprendre la durabilité
- » Constaté l'impact de nos produits
- » Travailler dans le respect des normes
- » Maximiser la rentabilité
- » Revoir le cycle de vie des produits pour réduire l'empreinte écologique

Chapitre 1

Mise à niveau de la durabilité des produits

Le terme *durabilité* a de nombreuses significations (et de nombreuses syllabes !). Il peut donc être difficile de savoir où vous vous situez dans ce processus. Ce chapitre se penche sur les principes de la durabilité des produits et met l'accent sur les domaines où les spécialistes de la gestion du cycle de vie peuvent exercer une influence déterminante sur certains produits. Les chapitres suivants abordent tous ces sujets plus en détail.

Définir la durabilité

En 1987, l'ONU, à travers la Commission Brundtland, a proposé une définition de la durabilité qui reste pertinente à ce jour. Cette notion repose sur un principe simple : satisfaire nos besoins actuels tout en préservant la capacité des futures générations à satisfaire les leurs. Nous chérissons tous notre confort quotidien – un foyer chaleureux, des transports pratiques, des voyages enrichissants et une alimentation saine. Nous souhaitons que nos descendants, même les plus lointains, puissent jouir de ces mêmes privilèges, voire de meilleurs, dans un environnement naturel épanoui. La durabilité représente ainsi cet équilibre délicat entre notre bien-être et la protection de notre planète. Elle nécessite donc l'adoption de solutions renouvelables pour nos biens et nos services.

La durabilité repose sur trois piliers fondamentaux : l'aspect environnemental, l'aspect social et la gouvernance. Ces piliers se déclinent en plusieurs sous-catégories, comme l'illustre la figure 1-1. Les éléments clairs de la figure 1-1 représentent les aspects que vous serez amené à prendre en compte dans la gestion du cycle de vie de vos produits. Veuillez noter tout de même que certains produits spécifiques, comme les détecteurs de fumée ou les armes, peuvent avoir des répercussions sociales, positives ou négatives.

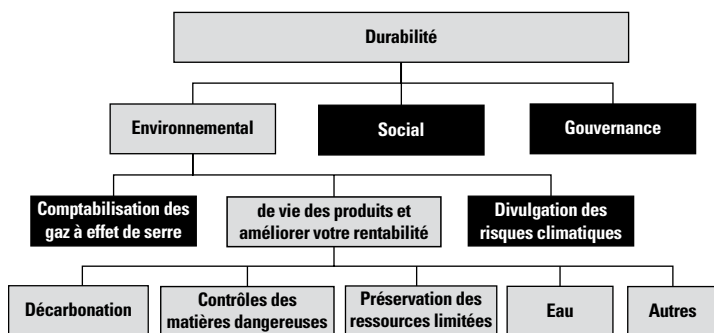


FIGURE 1-1 : Priorités communes en matière de durabilité pour les professionnels du cycle de vie des produits dans le secteur de la fabrication discrète.

Le terme ESG, qui remplace souvent le mot *durabilité*, englobe les aspects environnementaux, sociaux et de gouvernance. Cette approche s'aligne sur les 17 objectifs de développement durable établis par l'ONU. C'est une réalité : même si nous possédons aujourd'hui les technologies nécessaires pour protéger notre environnement, leur déploiement efficace nécessite une collaboration étroite entre les peuples et les nations. D'ailleurs, il est tout à fait possible d'aborder ces sujets de manière objective, sans prendre position politiquement.

Les objectifs sociaux, comme l'éradication de la pauvreté (objectif n° 1) et ceux liés à la gouvernance, comme la paix, la justice et les institutions efficaces (objectif n° 16) sont essentiels pour atteindre les objectifs environnementaux que j'aborde dans cet ouvrage. L'ensemble des spécialistes du cycle de vie des produits œuvrent dans le domaine environnemental, en s'appuyant sur des technologies validées scientifiquement et sur la création de valeur économique. Je me concentrerai particulièrement sur deux des 17 objectifs.

- » **Objectif n° 9 — Industrie, innovation et infrastructures :** ces domaines sont les piliers essentiels à la base de tout le cycle de vie d'un produit.
- » **Objectif n° 12 — Consommation et production responsables :** ces éléments sont liés à la fabrication, aux services et à l'exécution circulaire du cycle de vie des produits.



JARGON
TECHNIQUE

Pour le choix des matériaux et des pièces de vos projets, vous devez respecter certains critères de durabilité liés aux droits humains dans la chaîne logistique. Cependant, vous n'êtes pas directement responsable de l'évaluation de vos fournisseurs. Cette tâche relève du service des achats, qui vous fournit une liste de fournisseurs approuvés après vérification de leur conformité concernant les minerais de conflit et d'autres critères.

Nos produits ont un impact négatif sur l'environnement

Dans la partie précédente, j'ai souligné que l'environnement constituait le pilier ESG central de cet ouvrage, en lien avec les Objectifs de Développement Durable (ODD) de l'ONU. Je vais maintenant aborder les défis environnementaux auxquels vos entreprises doivent faire face et les pistes d'amélioration possibles. Vous trouverez des informations plus détaillées à ce sujet dans le chapitre 2.

Nos produits ont généralement trois impacts négatifs importants sur notre environnement :

» **Substances dangereuses** : les substances toxiques, comme le mercure, le plomb et le cadmium représentent une véritable menace pour la santé humaine et l'environnement. Les études scientifiques récentes ont également mis en évidence les dangers potentiels des plastiques. Quant aux métaux comme l'acier et l'aluminium, bien qu'ils soient généralement stables une fois transformés en produits, leur extraction minière génère des déchets susceptibles de contaminer les nappes phréatiques et les sols.

Dans le secteur minier, les résidus miniers sont des matériaux qui subsistent une fois que les minéraux valorisables ont été extraits du minerai.

» **Émissions de gaz à effet de serre** : tout au long de leur existence, les produits génèrent des gaz à effet de serre dès lors qu'ils nécessitent l'utilisation de combustibles fossiles, que ce soit pour leur fabrication ou leur fonctionnement. Prenons l'exemple des voitures qui ont besoin d'essence pour circuler. Il y a aussi tous ces appareils électriques dont l'alimentation dépend souvent de centrales à charbon ou gaz naturel. Et même les objets qui ne consomment pas directement d'énergie laissent une empreinte carbone lors de leur fabrication.

Remarque : certains produits, notamment ceux qui utilisent des systèmes de réfrigération, peuvent générer des émissions supplémentaires de gaz à effet de serre.

Les émissions de carbone incorporées représentent l'ensemble des gaz à effet de serre émis lors de la fabrication d'un produit, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à sa livraison, en passant par la transformation des matériaux et le transport.



JARGON
TECHNIQUE



JARGON
TECHNIQUE

» **Épuisement des ressources limitées** : la raréfaction des ressources naturelles est une réalité incontournable. En effet, les gisements de métaux, de minéraux et de pétrole présents dans notre sous-sol ne sont pas inépuisables. Si nous persistons dans notre modèle de consommation actuel, que ce soit en utilisant des véhicules gourmands en carburant ou en nous débarrassant simplement des objets cassés dans des décharges et incinérateurs, les générations futures seront privées de ces précieuses ressources.

Les entreprises prennent aujourd'hui leurs responsabilités environnementales au sérieux. Elles atténuent volontairement leur impact négatif sur l'environnement pour créer de la valeur ajoutée. Cette démarche, autrefois facultative, devient progressivement une obligation légale.

La conformité : une discipline imposée

La *conformité*, que j'aborde plus en détail dans le chapitre 2, consiste à respecter les réglementations. En ce qui concerne les substances dangereuses, nos secteurs industriels appliquent des mesures de conformité depuis une vingtaine d'années. Il est fort probable que vous ayez déjà mis en place des systèmes efficaces pour gérer ces substances à risque.

La décarbonation et l'économie circulaire représentent de nouvelles exigences réglementaires, contrairement aux règles sur les substances dangereuses qui existent depuis longtemps. Bien que chaque pays ait ses propres lois, c'est la directive européenne sur la communication d'informations en matière de durabilité des entreprises (CSRD) qui donne le ton à l'échelle internationale. Cette directive, qui encadre les enjeux environnementaux, sociaux et de gouvernance, ne se limite pas aux entreprises européennes. Elle concerne aussi les sociétés étrangères qui exportent vers l'UE. Concrètement, si vous vendez vos produits en Europe ou si vos fournisseurs y sont présents, vous devrez probablement respecter ces règles.

Pour les *experts en gestion du cycle de vie des produits*, la directive CSRD et sa réglementation associée imposent aux fabricants de nouvelles obligations :

- » Évaluer l'impact environnemental des produits
- » S'engager à réduire leur impact environnemental de façon mesurable
- » Recycler les matériaux issus des produits usagés et des pièces en fin de vie



RAPPEL

Pour un *économiste*, le changement climatique représente une défaillance du marché qui n'a pas su gérer les conséquences externes des émissions de gaz à effet de serre. Face à ce constat, on voit se multiplier des réglementations contraignantes visant à corriger cette situation.

D'un point de vue commercial, le non-respect des normes peut s'avérer très coûteux. Les amendes et sanctions juridiques, qui diffèrent selon les régions et zones économiques, ne représentent que la partie émergée de l'iceberg. Pour les entreprises en B2B, le véritable danger réside dans la perte potentielle de clientèle, car les acheteurs n'hésitent pas à éviter les fournisseurs qui ne respectent pas les règles.



CONSEIL

Ne voyez pas la conformité comme un obstacle. Elle permet plutôt d'améliorer les standards de conception des produits, d'établir des règles équitables pour tous et de créer de nouvelles opportunités commerciales rentables.

La rentabilité : une récompense attrayante

En matière de conformité, on se contente souvent de dire « Chef, on n'a pas le choix ! ». Mais se limiter à cocher les cases ne suffit pas à se démarquer. Il existe des approches bien plus efficaces pour créer de la valeur.

Notre approche se concentre sur la durabilité des produits, ce qui permet de mieux cerner les aspects essentiels en termes de valeur et d'efficacité. Nous associons ensuite chaque opportunité stratégique à des solutions innovantes qui ont démontré leur efficacité. Et même sans tenir compte des avantages liés à la conformité, les résultats s'alignent parfaitement avec vos objectifs commerciaux :

- » Réduction du coût des matériaux et des pièces grâce au recyclage, à l'allègement, à la prévention des déchets et aux logiciels intégrés.
- » Réduction des coûts de production grâce à l'efficacité énergétique, à la remise à neuf et à la remise en état.
- » Conception axée sur la valeur pour le client, sans aucune complication technique.
- » Augmentation du chiffre d'affaires initial grâce à la durabilité, à l'efficacité et à l'innovation logicielle intégrée.
- » Augmentation des revenus après-vente grâce à un service efficace, des mises à niveau et des marchés secondaires pour les produits.
- » Amélioration de la visibilité de votre chaîne logistique et de votre résilience face aux risques.
- » Développement de marchés grâce à la réputation de la marque et aux primes écologiques.

De toute évidence, cette liste est bonne pour les affaires et bonne pour l'environnement, et elle évite à votre entreprise de se retrouver devant les tribunaux.



Réduire l'impact environnemental d'un produit n'a de sens à long terme que si cette démarche reste économiquement viable. C'est cette conviction qui guide nos actions (voir section précédente). Nous vous conseillons de commencer par les solutions les plus simples à mettre en œuvre avant de vous attaquer aux défis plus complexes. De nombreuses opportunités sont déjà rentables, comme les énergies renouvelables, la dématérialisation, la production répartie ou encore la servicisation. D'autres, encore en développement, offrent un vrai potentiel stratégique pour les acteurs qui sauront les adopter plus tôt que le reste du marché. Pour plus d'informations sur les aspects économiques, consultez le chapitre 3.

Réduction de l'empreinte des produits grâce à la refonte du cycle de vie

Les premières démarches de durabilité se concentraient surtout sur la réduction de l'impact environnemental des opérations, en particulier dans l'industrie, où cet impact était facilement quantifiable. Les entreprises optimisaient leur consommation d'énergie, réduisaient leurs déchets et, quand cela était possible, elles passaient aux énergies renouvelables. Elles mettaient aussi en place des systèmes de capture des émissions, selon les contraintes réglementaires ou la rentabilité.

Cependant, face aux nouvelles exigences de la directive CSRD et aux attentes grandissantes des investisseurs et des clients, les industriels doivent aujourd'hui assumer leur responsabilité sur l'ensemble du cycle de vie de leurs produits, bien au-delà des murs de leurs usines. Cette responsabilité s'étend en amont, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à leur transformation, en passant par le transport et la fabrication des pièces livrées à l'usine. Elle se prolonge également en aval pour couvrir la consommation énergétique des produits, leur maintenance et leur impact carbone tout au long de leur utilisation.



Dans le secteur de la fabrication discrète, seuls 1 à 10 % de l'impact environnemental proviennent directement de la production. Le reste, soit 90 à 99 %, découle des activités en amont et en aval. Il ne suffit donc plus de se focaliser uniquement sur la durabilité des opérations de fabrication : les entreprises doivent désormais prendre en compte l'ensemble du cycle de vie de leurs produits. C'est là que les spécialistes en gestion du cycle de vie jouent un rôle crucial. Pour réduire efficacement leur empreinte environnementale tout en restant rentables, les entreprises doivent s'appuyer sur des processus solides et une infrastructure numérique performante.

Pour de plus amples informations sur les principes de conception durable, consultez le chapitre 4. Le chapitre 5 vous expliquera comment appliquer ces principes sur la totalité du cycle de vie.

- » Étudier l'impact des produits sur l'environnement
- » Comprendre les lois visant à réduire les dommages à l'environnement

Chapitre 2

Résolution des problèmes liés à l'écologie et à la conformité

Les thèmes présentés dans ce chapitre sont essentiels pour comprendre les défis à relever en matière de durabilité des produits. Mon objectif n'est pas de vous décourager. Il est important d'aborder ces questions en gardant à l'esprit qu'il faut accepter à la fois les aspects positifs et les réalités plus difficiles.

Dans ce chapitre, vous verrez comment les produits peuvent avoir un impact négatif sur l'environnement, et quelles étapes du cycle de vie sont les plus importantes à cet égard. J'explique aussi comment la réglementation pousse les industriels à atténuer ces impacts négatifs, qu'on appelle généralement des externalités.

Identification du problème

De nos jours, les produits industriels n'ont rien d'écologique. Ils participent à la pollution, au réchauffement climatique et à l'épuisement de nos ressources limitées. Dans vos communications marketing, évitez d'utiliser des termes comme « *produit durable* » ou « *produit écologique* ». Même si vous visez la neutralité carbone, privilégiez plutôt pour l'instant des expressions plus nuancées comme « *produits plus respectueux de l'environnement* ».



JARGON
TECHNIQUE

Pour atteindre la *neutralité carbone*, une entreprise doit d'abord réduire drastiquement ses émissions de gaz à effet de serre, en général de plus de 90 % par rapport au niveau initial. Comme il est techniquement difficile d'éliminer totalement les émissions, les 10 % restant peuvent être compensés par l'achat de crédits carbone afin d'aboutir à un bilan carbone net nul.

Les neuf limites planétaires

Notre Terre nous fait vivre grâce à trois éléments essentiels : une fine couche d'atmosphère, une mince biosphère (comprenant sols et terres) et une géosphère massive (croûte et manteau terrestre). Avec plus de 8 milliards d'humains qui se déplacent et aspirent à un meilleur niveau de vie, nous exerçons des pressions sans précédent sur ces systèmes vitaux.

Le Centre de Résilience de Stockholm a développé le concept des « neuf limites planétaires » pour surveiller ces défis environnementaux. Ce cadre identifie neuf aspects de la dégradation environnementale causée par l'activité humaine (voir la figure 2-1). Les limites qui se maintiennent dans une zone de sécurité sont viables à long terme, contrairement à celles qui sont franchies. Notre priorité devrait être de ramener ces dernières dans la zone de sécurité, idéalement avant que la nature ne rétablisse elle-même l'équilibre par des mécanismes brutaux.

Bien que plusieurs zones de sécurité aient déjà été franchies, comme indiqué dans la figure 2-1, tout n'est pas perdu. Un exemple encourageant est celui de la couche d'ozone stratosphérique, qui était la préoccupation environnementale majeure à la fin des années 1980. Les réfrigérants et autres produits chimiques détruisaient la couche d'ozone et menaçaient d'exposer tous les organismes vivants à des radiations dangereuses. Heureusement, la technologie a proposé des solutions (des alternatives chimiques à coût raisonnable) et les dirigeants du monde entier ont agi avec détermination (Protocole de Montréal). Aujourd'hui, cette limite est revenue dans la zone de sécurité, la couche d'ozone se reconstitue progressivement, et nous continuons à profiter de la climatisation et de boissons fraîches à des prix abordables.

Dans la fabrication discrète, certains produits peuvent vous aider à respecter toutes ces limites. Par exemple :

- » L'agriculture de précision permet d'éviter la surfertilisation et l'usage excessif de pesticides en utilisant des tracteurs, des semoirs, des drones et d'autres équipements modernes. Cette démarche optimise les processus biochimiques.
- » L'amélioration des technologies de traitement des eaux permet de rendre l'eau douce plus propre et plus sûre.

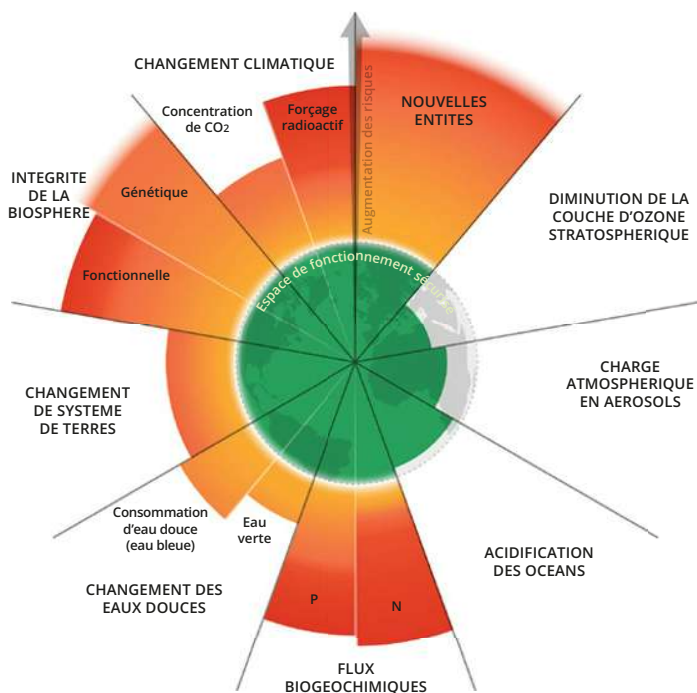
Si vous utilisez déjà ces produits, félicitations. Les marchés vous récompenseront pour vos efforts dans ce domaine.



ATTENTION

Parmi les neuf limites planétaires, certaines sont menacées par notre activité humaine. C'est notamment le cas des nouvelles substances créées par l'homme, comme les microplastiques, qui représentent un danger réel. Le réchauffement climatique et l'acidification des océans, deux phénomènes liés aux émissions de gaz à effet de serre, sont également préoccupants. Mais il y a de l'espoir : tout comme nous avons réussi

à protéger la couche d'ozone, nous développons aujourd'hui des solutions techniques et économiques pour faire face à ces défis environnementaux.



Source : Données sur l'azote fournies par le Stockholm Resilience Centre, Université de Stockholm. Richardson et al. (2023), Steffen et al. (2015) et Rockström et al. (2009).

FIGURE 2-1 : Les neuf limites planétaires.

Décarbonation

La *décarbonation* vise à diminuer notre empreinte carbone en réduisant les émissions de gaz à effet de serre (EGS). Ces émissions sont composées majoritairement de dioxyde de carbone, mais incluent aussi d'autres gaz, comme le méthane.

Parmi les neuf limites planétaires, le dérèglement climatique est considéré comme le défi le plus pressant à relever. Dans le secteur de la fabrication discrète, les émissions de gaz à effet de serre sont essentiellement dues à l'utilisation de combustibles fossiles tout au long du processus de production.



ATTENTION

La figure 2-2 illustre ce problème. Dans la nature, quand des éléments de la biosphère brûlent, comme un arbre mort en forêt, leur matière est vite réintégrée dans le cycle naturel pour former de nouvelles plantes. En revanche, les énergies fossiles, piégées depuis des millions d'années

dans les profondeurs de la Terre, posent un tout autre problème. Leur combustion libère dans l'air du carbone qui ne peut pas être naturellement réabsorbé par la géosphère, ce qui crée un déséquilibre dans le cycle du carbone.

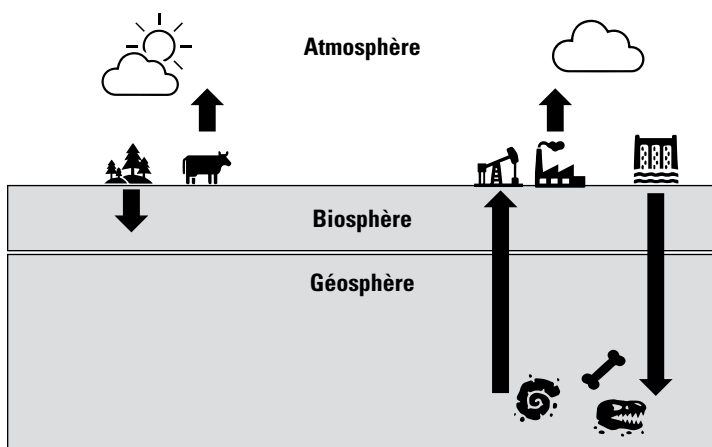


FIGURE 2-2 : Le cycle du carbone.

Les systèmes de captage du carbone, développés par des entreprises comme Climeworks et Charm Industrial, permettent de réintroduire le dioxyde de carbone dans les couches géologiques de la Terre. Les projections les plus optimistes suggèrent que, dans les années 2030-2040, ces solutions pourraient se déployer massivement pour réinjecter environ 10 % des émissions actuelles dans la géosphère, et ce, à des coûts raisonnables. Pour parvenir à la neutralité carbone via ces méthodes de captage, il n'est pas impératif d'abandonner totalement les énergies fossiles. Néanmoins, nous devons diminuer significativement leur utilisation et privilégier des combustibles plus propres (le gaz naturel émet 50 % moins que le charbon, le pétrole se situant entre les deux en termes d'émissions).

Préservation des ressources limitées

Le secteur de la fabrication discrète se doit de réduire sa consommation d'énergies fossiles et de mieux gérer les matières dangereuses. Pour préserver nos réserves de charbon, de pétrole et de gaz naturel dans le sous-sol (pour des raisons à la fois écologiques et économiques), il nous faudra extraire de grandes quantités de métaux et de minéraux dans les décennies à venir. Cette exploitation sera nécessaire pour transformer nos infrastructures énergétiques en installant des éoliennes, des batteries, des panneaux solaires, des centrales nucléaires et des réseaux électriques intelligents.

Le schéma de McKinsey, visible sur la figure 2-3, met en évidence les différentes ressources nécessaires pour mener à bien la transition énergétique. Ces mêmes ressources sont également indispensables à la fabrication de nombreux produits de notre quotidien, qu'il s'agisse de nos smartphones, nos voitures, nos avions, nos appareils électroménagers ou encore nos dispositifs médicaux.

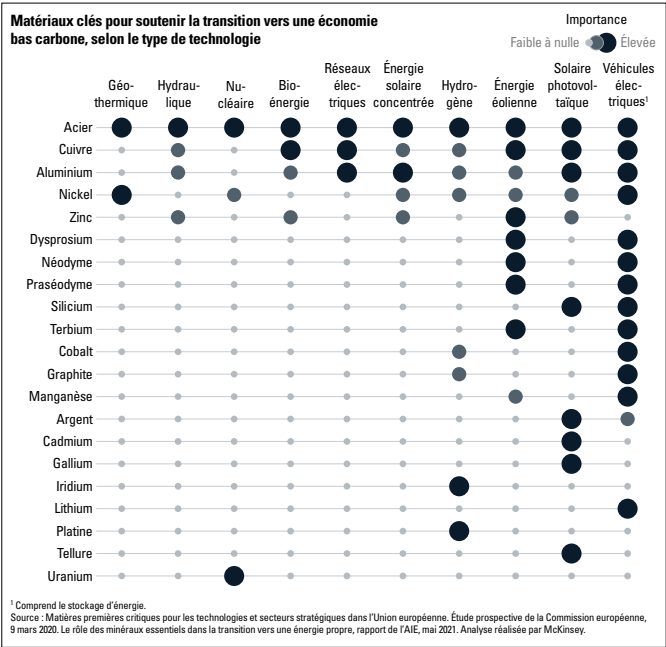


FIGURE 2-3 : Matériaux épuisables essentiels à l'économie

Pour plus d'informations sur la figure 2-3, veuillez consulter le site [PTC . com/beyond-the-book](https://www.ptc.com/beyond-the-book).

Le défi majeur auquel font face les pays développés, comme les États-Unis, l'Europe, le Japon, la Corée du Sud et d'autres nations industrialisées, est la pénurie de ces ressources sur leurs territoires. C'est pourquoi, au-delà des avantages écologiques évidents, l'économie circulaire est aujourd'hui promue comme une stratégie de sécurité nationale car elle permet de conserver et de réutiliser ces matériaux essentiels au sein même des économies nationales.



L'économie circulaire s'impose naturellement dans les pays industrialisés, car elle répond à une véritable nécessité économique. Sans un approvisionnement constant en matières premières, toute la chaîne de production risque de se retrouver paralysée.

Réglementation des problèmes

Pour faire face aux défis de la fabrication discrète, la réglementation impose désormais des normes strictes concernant la gestion des substances dangereuses, la réduction des émissions carbone et l'économie circulaire. Ces *exigences réglementaires* représentent des paramètres essentiels à prendre en compte dans le développement et la conception de vos produits.

Rassurez-vous, même si les réglementations et les normes environnementales semblent complexes, les services juridiques et conformité sont là pour vous guider. En tant que spécialiste du cycle de vie, vous n'avez qu'à vous concentrer sur quelques actions clés, bien connues dans le domaine et répertoriées dans le tableau 2-1.

TABLEAU 2-1: Réglementations visant à réduire l'empreinte carbone

Règlement ou directive	Pertinence par rapport au cycle de vie du produit
Directive sur la publication d'informations en matière de durabilité des entreprises (CSRD)	Exige des entreprises concernées qu'elles déclarent leur impact environnemental. Les fabricants de l'UE et leurs chaînes logistiques mondiales peuvent être concernés (notamment presque tous les sous-traitants en fabrication discrète de taille moyenne et de grande taille dans le monde).
Directive relative à la diligence raisonnable en matière de durabilité des entreprises (CSDDD)	Liée à la directive CSRD. Tandis que la CSRD se concentre sur la <i>transparence des données</i> , la CSDDD va plus loin en imposant aux entreprises des <i>mesures concrètes</i> . Elle les contraint à diminuer leur empreinte écologique de façon mesurable, notamment en mettant l'accent sur la réduction des émissions de carbone et l'adoption d'une économie circulaire.
Enregistrement, évaluation, autorisation et restriction des substances chimiques (REACH)	Contrôle des matières dangereuses pour tout produit. Cette norme concerne une longue liste de substances (241 substances à ce jour).
Restriction des substances dangereuses (RoHS)	Contrôle des matières dangereuses dans les équipements électriques et électroniques. S'applique à 10 substances seulement.
Déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE)	Les produits sont conçus selon une approche circulaire, accompagnés d'une taxe imposée aux fabricants pour soutenir la collecte des déchets électroniques dans les centres de recyclage publics.



Ne vous inquiétez pas si vous ne maîtrisez pas tous les aspects réglementaires. En tant que spécialistes du cycle de vie, votre rôle principal est simplement de calculer l'impact environnemental de vos produits et de chercher continuellement des moyens de le réduire.

Déclarations de performance environnementale

Les préoccupations environnementales ont conduit à la création des déclarations de performance environnementale (EPD) pour les produits. Ces documents fonctionnent comme une étiquette nutritionnelle, mais pour l'environnement : ils détaillent l'empreinte écologique d'un produit. Comme illustré dans l'exemple à la figure 2-4, une EPD mesure différents aspects environnementaux, tels que la consommation énergétique, l'empreinte carbone, l'acidification des océans, la pollution des eaux, la dégradation de la couche d'ozone et la formation d'ozone troposphérique.

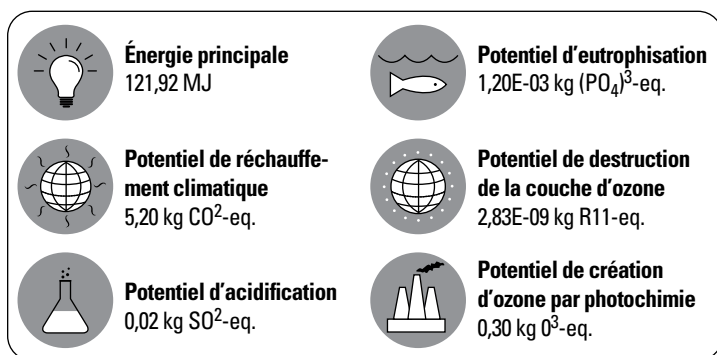


FIGURE 2-4 : Exemple d'une EPD.

Les EPD sont une version simplifiée des analyses complètes du cycle de vie. Bien que certains consommateurs avisés puissent s'en servir pour guider leurs achats, ces déclarations sont actuellement plus répandues dans les échanges commerciaux entre entreprises. À l'avenir, cette tendance pourrait évoluer si l'on adoptait des formats d'EPD plus accessibles et mieux adaptés au grand public.



CONSEIL

Vos systèmes de nomenclature peuvent grandement automatiser les analyses du cycle de vie (ACV) et les déclarations de performance environnementale (EPD).

Réglementations relatives aux matières dangereuses

En matière de réglementations sur les matières dangereuses comme REACH et RoHS, le principe est simple : il est préférable d'éviter leur utilisation au-delà des seuils autorisés. Si leur utilisation s'avère nécessaire, vous devrez démontrer leur innocuité tant pour les personnes qui les manipulent que pour l'environnement, depuis la production jusqu'à la fin de vie du produit, en passant par son utilisation.



Les PFAS, également appelés substances perfluoroalkylées et polyfluoroalkylées, sont pressentis pour être le prochain groupe de matières dangereuses à faire l'objet d'un encadrement strict. Cependant, au moment où nous écrivons ces lignes, aucune réglementation harmonisée n'a encore été mise en place pour contrôler ces pièces. Si vous avez des articles dotés de propriétés anti-chaueur, anti-graisse ou imperméables, il est possible que vous deviez atténuer les risques liés aux PFAS.

Réglementation en matière de décarbonation

La nouvelle réglementation CSRD exige la mesure des émissions de gaz à effet de serre, tandis que la directive CSDDD pousse les entreprises à se fixer des objectifs de réduction basés sur la science (SBT) pour parvenir à la neutralité carbone. Il est donc logique de commencer par mesurer ce que l'on cherche à optimiser.

Le protocole sur les gaz à effet de serre

À l'instar de la comptabilité financière qui suit des normes précises, comme les principes comptables généralement admis (PCGR), et utilise le dollar comme unité de référence, le suivi des émissions de gaz à effet de serre s'appuie sur un cadre spécifique : le Protocole GES. Ce dernier permet de quantifier les émissions en tonnes métriques d'équivalent en dioxyde de carbone (MTCO_{2e}). Le système de comptabilisation des GES est organisé en différents périmètres, appelés *scopes*, chacun étant conçu pour orienter les entreprises vers des pratiques plus vertueuses. Ces cadres sont particulièrement importants pour les spécialistes qui travaillent sur l'analyse du cycle de vie.

- » **Scope 1 — Émissions directes** : carburants et combustibles consommés dans les locaux professionnels, sites industriels et véhicules d'entreprise, qu'ils soient en propriété ou en location (hors consommation des prestataires externes). Les industriels sont vivement encouragés à abandonner les énergies fossiles dans leurs installations au profit de l'électricité ou d'autres énergies renouvelables. Ce cadre les invite également à diminuer l'empreinte carbone de leur flotte de véhicules, notamment en limitant les déplacements et en privilégiant les véhicules électriques.
- » **Scope 2 — Émissions indirectes (production d'électricité)** : cette catégorie concerne l'électricité issue des énergies fossiles, comme le charbon, le gaz naturel et le pétrole, ainsi que la vapeur achetée. L'objectif est d'inciter les entreprises à délaisser ces sources d'énergie polluantes au profit de l'électricité verte, produite à partir d'énergies renouvelables. (*Remarque* : l'énergie nucléaire émet peu de carbone, mais elle n'est pas considérée comme renouvelable, même si elle reste une solution viable pour diminuer les émissions du Scope 2.
- » **Scope 3 — Émissions indirectes (chaîne de valeur)** : ce cadre englobe toutes les émissions générées tout au long de votre chaîne de

valeur, aussi bien en amont, lors de la fabrication de vos pièces, qu'en aval, après la commercialisation de vos produits. Le Scope 3 se décline en plusieurs catégories, dont certaines sont particulièrement pertinentes pour votre activité. En voici quelques exemples :

- **3.1 — Biens et services achetés** : cette catégorie comprend l'empreinte carbone des matériaux livrés à votre site de production. Ces émissions s'accumulent tout au long de votre chaîne logistique, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à leur transformation, en passant par le transport et la fabrication. Cette approche encourage les entreprises à sélectionner des fournisseurs plus respectueux de l'environnement et à optimiser leur consommation de matériaux.
- **3.4 — Transport et distribution** : cette catégorie comprend les émissions liées au transport dans la chaîne logistique. Elle vise à encourager les entreprises à diminuer leur impact environnemental en privilégiant des modes de transport plus écologiques, comme le transport terrestre plutôt que l'avion, ou l'utilisation d'énergies vertes à la place des combustibles fossiles. De plus, elle incite les fabricants à favoriser les circuits courts en s'appuyant sur des réseaux logistiques locaux.
- **3.11 — Utilisation des produits vendus** : il s'agit de l'énergie consommée par les clients pour faire fonctionner vos produits, qu'il s'agisse de carburant ou d'électricité non renouvelable. Cette catégorie encourage les entreprises à abandonner les produits dépendant des énergies fossiles au profit de sources d'énergie renouvelables, notamment via l'électrification.
- **3.12 — Mise au rebut en fin de vie** : cette catégorie englobe les émissions de carbone liées à la fin de vie des produits et pièces, qu'ils soient transportés, incinérés ou laissés à se décomposer. Les entreprises sont encouragées à s'orienter vers une économie circulaire, une démarche qui permet aussi de réduire leur empreinte carbone au niveau des achats, conformément aux objectifs du Scope 3.1.

Votre entreprise ne vous demandera pas de calculer son empreinte carbone globale, car celle-ci inclut les activités de bureau, les déplacements professionnels et bien d'autres éléments. Cependant, elle vous demandera de calculer l'empreinte carbone de ses produits (PCF). En matière de GES, le calcul de l'empreinte carbone d'un produit comprend les éléments suivants :

- » Le carbone intégré dans les matériaux et pièces livrés par vos fournisseurs, transport inclus, jusqu'à vos sites de production (Scopes 3.1 et 3.4)
- » Les émissions provenant de l'utilisation d'énergies fossiles dans vos sites de production (Scopes 1 et 2)

- » La consommation d'énergie non renouvelable estimée tout au long du cycle de vie du produit (Scope 3.11)
- » Les émissions qui seront générées lors du recyclage ou de la mise au rebut du produit en fin de vie (Scope 3.12)

Les activités d'un technicien, telles que les déplacements, la livraison de pièces détachées, le transport opérationnel et la consommation de carburant, doivent également être prises en compte, même si elles ont généralement un impact environnemental moindre.

La gestion de ces pièces peut paraître délicate, mais votre logiciel de gestion du cycle de vie des produits (PLM) est là pour vous simplifier la tâche. Une nomenclature détaillée facilite le traitement des données essentielles au calcul de l'empreinte carbone. Elle permet notamment de rassembler les informations sur le carbone et d'autres caractéristiques, que ce soit au niveau des matériaux, des pièces ou des différentes configurations du produit.

Engagements en matière de neutralité carbone

Une autre partie de votre responsabilité en matière de décarbonation consiste à éliminer complètement les PCF grâce à des approches scientifiques rigoureuses. Les nouvelles réglementations européennes CSRD et CSDDD imposent désormais à de nombreuses entreprises d'atteindre la neutralité carbone, avec des réductions qui doivent être validées par des audits scientifiques. Même si cette ambition touche toute l'entreprise, les produits étant la source principale des émissions industrielles, c'est essentiellement à vous qu'il revient de réaliser ces réductions majeures.

La figure 2-5 présente un parcours scientifique permettant d'atteindre la neutralité carbone, qui comporte les éléments suivants :

- » **Une mesure de référence** : il s'agit du point de départ environnemental de votre entreprise, qui servira de référence pour mesurer vos futures réductions d'émissions.
- » **Engagement à court terme pour 2030** : d'ici 2030, vous devez réduire vos émissions directes et indirectes (Scopes 1 et 2) d'au moins 42 %. En outre, votre plus grande source d'émissions indirectes (généralement correspondant aux achats de biens et de services, Scope 3.1) doit diminuer d'au moins 25 %.
- » **Engagement à atteindre la neutralité carbone d'ici 2050** : d'ici 2050, vous devrez réduire vos émissions nettes de plus de 90 % par rapport à votre niveau de référence. Pour compenser les émissions résiduelles (qui ne peuvent dépasser 10 %), vous devrez acquérir des crédits carbone certifiés afin de parvenir à la neutralité carbone.

Les compensations carbone ont un coût réel, mais vous n'êtes pas tenu de les mettre en place avant votre objectif de neutralité carbone. Prenons un exemple : imaginons qu'en 2051, l'un de vos fournisseurs utilise encore des équipements fonctionnant aux énergies fossiles. Si cette machine émet 1 MTCO₂e pour produire vos matériaux, cette émission sera comptabilisée dans votre bilan Scope 3.1. Pour respecter vos engagements, vous pourrez faire appel à une entreprise comme Climeworks qui capturera définitivement 1 tonne de CO₂ au prix du marché (disons 100 dollars). Ainsi, vous atteindrez votre objectif de neutralité carbone, mais vos matériaux vous coûteront 100 dollars de plus.

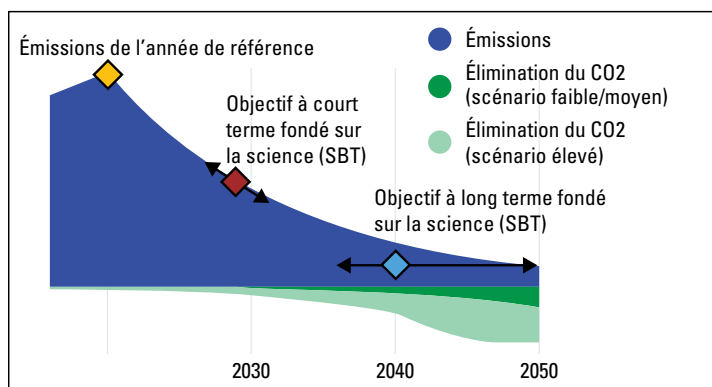


FIGURE 2-5 : Le chemin vers la décarbonation.

Pour plus d'informations sur la figure 2-5, veuillez consulter le site PTC. com/beyond-the-book.

Réglementation en matière de circularité

La *circularité des produits* vise à minimiser les déchets en privilégiant plusieurs approches : réparer, réutiliser, reconditionner, refabriquer et recycler. De nos jours, la directive DEEE encadre le recyclage de base des appareils électroniques, conformément aux réglementations REACH et RoHS qui contrôlent l'élimination des substances dangereuses généralement présentes dans ces équipements.

À compter des années 2020, les passeports numériques de produits (DPP) imposent à certains fabricants de batteries de gérer la circularité des matériaux de leurs produits, y compris la récupération des pièces et des articles en fin de vie. Cette obligation s'étendra progressivement à d'autres catégories de produits, même si le calendrier précis n'était pas encore établi au moment de la rédaction de ce document.

Dans la figure 2-6, le passeport présente une synthèse des impacts environnementaux et des flux de matériaux des produits physiques. Il fournit

un aperçu détaillé des pièces utilisées, des matières dangereuses présentes, de l'impact environnemental en termes d'émissions de CO2, de la quantité d'eau nécessaire à la fabrication, ainsi que des possibilités de recyclage du produit. Ces informations sont disponibles et rendues publiques avant la commercialisation. Les informations post-vente incluent les achats de pièces détachées, les justificatifs de retour de ces pièces ainsi que tous les documents attestant des transferts ou des retours en fin de cycle de vie.

Pour ce type de passeport, des questions persistent concernant l'étendue précise de la traçabilité des données, que ce soit avant ou après la commercialisation. Les produits de valeur dotés de numéros de série nécessitent généralement un suivi plus poussé après leur vente, contrairement aux biens non durables vendus en lots durant les phases initiales.

Résumé

Numéro de série du produit : 4040425A1

Fabricant du produit : Universal Exports

Modèle de produit : Lightning-A.1

Empreinte carbone : 1,2 kg

Utilisation de l'eau : 14,5 litres

Composition des matériaux

1,23 kg d'aluminium (60 % recyclé)

0,29 kg d'acier inoxydable (30 % recyclé)

0,003 kg de cobalt (0 % recyclé)

Journal d'activité

2024-11-18 : fabrication dans nos installations de Denver

2024-11-19 : réception par le propriétaire XYZ

2025-01-23 : pièce 123 remplacée par la pièce RMA 456

FIGURE 2-6 : Exemple simplifié d'un passeport numérique de produit (DPP).

Les DPP exigent une base technique robuste, tant au niveau de l'étude que des données de service. L'avantage, c'est qu'au-delà des aspects réglementaires, ces passeports représentent une source importante de revenus supplémentaires, un sujet que j'aborde plus en détail dans le chapitre 3.

- » Techniques d'apprentissage pour réduire efficacement l'empreinte écologique
- » Priorité à la décarbonation et à la circularité

Chapitre 3

Alignement de la durabilité et de la valeur commerciale

Réduire durablement l'empreinte écologique d'un produit n'a de sens que si cette démarche est rentable. Pour être vraiment efficace, le discours écologique ne peut pas se limiter au simple argument environnemental. Il doit s'inscrire dans une démarche stratégique globale et sincère de l'entreprise.

Fort heureusement, les possibilités de faire des investissements rentables ne manquent pas, et se multiplient même grâce aux avancées technologiques et à l'évolution du marché. On trouve notamment des produits innovants qui, tout en étant plus respectueux de l'environnement que leurs prédécesseurs, permettent de réaliser de belles plus-values.

- » **Grand public** : pour un prix similaire, les ampoules LED ont une durée de vie 30 fois plus longue et permettent de réaliser 7 fois plus d'économies d'énergie que les ampoules à incandescence.
- » **Industrie automobile** : les groupes motopropulseurs électriques comptent environ 20 pièces mobiles, contre environ 2 000 pour les groupes motopropulseurs à combustion interne. La recharge coûte 50 à 90 % moins cher que le ravitaillement en carburant. L'accélération des véhicules électriques (VE) est environ 50 % plus rapide que celle des voitures à combustion interne de prix comparable.
- » **Industrie** : les installations solaires et éoliennes s'avèrent généralement plus rentables que la construction de nouvelles centrales fonctionnant aux énergies fossiles, surtout quand il s'agit de projets de grande envergure. Même à plus petite échelle, les installations solaires deviennent rentables au bout de 5 à 7 ans en moyenne.
- » **Haute technologie** : un smartphone permet d'accomplir bien plus de tâches et coûte moins cher qu'un ensemble d'appareils individuels, comme un téléphone à clapet, un GPS, un appareil photo numérique, un lecteur MP3, une calculatrice et une lampe de poche.

» **Aérospatiale** : grâce aux progrès technologiques, notamment les turboréacteurs à réducteur, l'utilisation de matières composites allégées et un meilleur aérodynamisme, nous avons réussi à réduire la consommation de carburant de 15 à 20 %. Grâce à une densité de sièges supplémentaires de 8 % dans les avions et à 10 % d'optimisation des horaires de vol, le rendement par passager s'est même amélioré de 30 à 40 %.

Ce chapitre décrit les avantages de la décarbonation et de l'économie circulaire. Contrairement à la gestion des matières dangereuses (sujet traité dans le chapitre 2), ces deux approches permettent une plus grande souplesse dans l'atteinte des objectifs réglementaires. En plus d'assurer la conformité, elles présentent souvent l'avantage de générer des bénéfices financiers supplémentaires.

Valeur de la décarbonation

Les émissions de carbone représentent un coût important, et leur réduction peut s'avérer économiquement avantageuse. Selon une étude de McKinsey illustrée dans la figure 3-1, les entreprises de fabrication discrète peuvent diminuer leurs émissions de carbone de façon rentable, avec une réduction possible de 20 à 60 % d'ici 2030. La majorité d'entre elles pourrait même atteindre une réduction comprise entre 50 et 60 %.

PERSPECTIVE DES ANALYSTES SUR L'ALIGNEMENT DE LA VALEUR

Dans un rapport de 2024, l'analyste Paul Miller de Forrester met en lumière les avantages économiques liés à la réduction de l'empreinte carbone. Il explique que le secteur industriel a consommé près d'un tiers de l'énergie mondiale et généré 38 % des émissions de CO₂ en 2021, tout en étant un grand consommateur de ressources naturelles épuisables. Face à l'augmentation des coûts énergétiques et des matières premières, ainsi qu'au durcissement des normes environnementales, réduire sa consommation et ses déchets devient une stratégie économique pertinente, même pour les dirigeants les plus réticents aux enjeux climatiques.

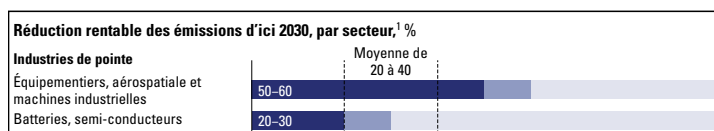


FIGURE 3-1 : Des économies de coûts qui réduisent également les émissions.

Pour plus d'informations sur la figure 3-1, veuillez consulter le site PTC.com/beyond-the-book.



plus rapide, ont plus de difficulté à réutiliser les anciennes pièces pour réduire les émissions de carbone dans les nouveaux produits. Cependant, selon Mark Reisig de CIMdata, les entreprises technologiques qui misent sur des équipements écoénergétiques, le recyclage des matériaux et l'optimisation de leur chaîne logistique pour diminuer leur empreinte carbone obtiennent des résultats probants. En effet, ces investissements verts leur ont rapporté entre 10 et 30 % de retour sur investissement en seulement un an et demi.

Cette section vous présente, en tant que spécialiste du cycle de vie des produits, les mesures à prendre pour saisir les opportunités de la décarbonation.

Réduire la quantité de matériaux dans la conception des pièces

Les logiciels modernes de conception assistée par ordinateur (CAO) intègrent désormais des fonctionnalités de conception générative, associées à des outils de simulation performants. Cette combinaison permet d'optimiser intelligemment l'utilisation des matériaux tout en respectant un ensemble de critères spécifiques, qu'il s'agisse de contraintes géométriques, thermiques, mécaniques ou liées aux procédés de fabrication. La figure 3-2 montre comment l'approche générative propose trois solutions optimisées qui respectent les contraintes tout en minimisant la quantité de matière nécessaire pour la colonne de direction d'un vélo électrique. L'ingénieur opte pour une solution qui trouve le juste équilibre avec les autres paramètres, notamment les critères financiers. Les procédés additifs permettent habituellement d'économiser davantage de matériaux, mais ils risquent d'être plus coûteux ou de ralentir la production par rapport aux méthodes soustractives.

Les ingénieurs expérimentés m'ont avoué que les nouveaux venus, en utilisant ces techniques d'optimisation, créent des pièces d'une efficacité remarquable, dépassant même ce qu'ils auraient pu concevoir à la main après des années de métier. La CAO permet d'optimiser l'utilisation des matériaux. Elle entraîne ainsi une réduction des émissions de carbone chez nos fournisseurs (Scope 3.1) et une diminution des coûts liés aux matières premières. Un autre atout majeur réside dans l'allègement du poids, ce qui peut améliorer considérablement l'efficacité énergétique des véhicules et autres applications mobiles (Scope 3.11). J'aborde le thème des Scopes dans le chapitre 2.



FIGURE 3-2 : Exemple de matériau retiré grâce à la conception générative.

Dématérialiser grâce aux logiciels embarqués

Grâce à la réduction au maximum de l'utilisation de pièces mécaniques, vous pouvez substituer certains éléments mécaniques par des solutions logicielles. Je me souviens d'une histoire qui montre parfaitement ce dont je parle. J'ai été contacté pour un rappel concernant ma voiture électrique. Le mécanisme de sûreté de la fenêtre fonctionnait mal, ce qui représentait un danger réel, notamment pour les enfants qui pourraient se coincer les doigts en jouant avec. Je me suis dit : « Oh non. Je vais devoir passer plusieurs heures dans la salle d'attente d'un concessionnaire devant des feuilletons télévisés ». En lisant la suite, j'ai découvert que, sur mon modèle de voiture, le constructeur avait supprimé le détecteur mécanique de la vitre pour le remplacer par une solution logicielle. Il devait juste faire une mise à jour à distance du système pour régler le souci de sécurité en deux temps, trois mouvements.

Le remplacement de ce capteur de fenêtre par un logiciel a permis au fabricant de réduire les coûts, le poids et l'empreinte carbone d'une pièce physique dans sa nomenclature. Cette démarche lui a également évité de devoir faire appel à des techniciens pour pouvoir remplacer des pièces. En outre, en tant que client régulier, j'ai vraiment apprécié cette solution efficace qui m'a complètement rassuré.



CONSEIL

Pour atteindre cet objectif, nous devons adopter une vision globale dans la conception des produits, en intégrant à la fois la gestion du cycle de vie des applications (ALM) et des produits (PLM). Cette démarche permettra aux logiciels embarqués modulaires de s'harmoniser parfaitement avec

les aspects mécaniques modulaires. Ces systèmes, alliant logiciel et matériel, doivent faire l'objet d'une surveillance rigoureuse et répondre à des critères stricts, notamment pour les fonctions liées à la sécurité, comme le mécanisme de lève-vitre électrique.

Améliorer les données et la sélection des fournisseurs

L'impact financier et écologique varie beaucoup selon les matériaux bruts et les pièces utilisées. Les risques sont aussi très variables. Lorsque vos ingénieurs d'études, notamment ceux qui gèrent les nomenclatures, ont accès aux bases de données des matériaux et de la logistique, ils peuvent faire de meilleurs choix dès le départ. Au fur et à mesure que les propositions des fournisseurs évoluent, elles révèlent des opportunités d'optimisation à moindre coût, ce qui permet de réduire les dépenses, l'impact environnemental et les risques. D'ailleurs, le fait de changer de fournisseur pour les matières premières n'affecte généralement ni la qualité ni le processus de production.

Trouver un équilibre dans les critères de sélection des matériaux

Alors que nous pouvons facilement changer de fournisseur de matières premières sans trop de conséquences financières, modifier les matériaux d'une pièce est beaucoup plus complexe. Un tel changement entraîne de nombreuses adaptations, que ce soit au niveau de la forme, des performances, des outils de fabrication et bien d'autres aspects.

Les matériaux ont des propriétés techniques. Celles-ci ne changent pas au fil du temps ni d'un fournisseur à l'autre. Le coefficient de dilatation thermique du cuivre est toujours de 0,000017. Si vous ne gérez qu'une poignée de matériaux et que seules leurs caractéristiques techniques fixes vous importent, vous pouvez vous passer d'une base de données commerciale de matériaux.

Cependant, en matière de durabilité, vous devez prendre en compte trois aspects dynamiques des données relatives aux matériaux.

Empreinte, coût et risques

Les coûts et l'impact environnemental des matériaux fluctuent constamment et varient selon les fournisseurs. Les bases de données de matériaux suivent les tendances mondiales en termes de coûts moyens et d'empreinte carbone, sans se focaliser sur des fournisseurs spécifiques. Ces moyennes globales sont généralement assez fiables pour guider le choix des matériaux (par exemple, entre l'aluminium et l'acier, ou entre différentes qualités d'acier) en tenant compte du budget, des performances et de l'impact environnemental. Le choix du fournisseur intervient habituellement plus tard dans le processus de conception.

Nouveaux mélanges recyclés

Les matériaux traditionnels comme l'acier connaissent une véritable évolution grâce à l'incorporation croissante d'éléments recyclés et à des procédés de fabrication innovants, ce qui permet notamment d'obtenir de l'acier composé à 80 % de matières recyclées. Ces différents mélanges et procédés de fabrication se distinguent tant par leurs coûts et leur impact environnemental que par leurs propriétés techniques. Vous ne pouvez tout simplement pas remplacer de l'acier vierge par de l'acier recyclé et obtenir la même résistance, la même rigidité et les mêmes propriétés de performance.

Nouveaux matériaux

Les progrès de l'IA, associés à des investissements croissants dans la recherche sur les matériaux fondamentaux, permettent aujourd'hui de développer de nouvelles pièces à une vitesse vertigineuse. L'intégration des bases de données de matériaux aux logiciels de conception et de gestion du cycle de vie des produits est cruciale pour permettre aux décideurs de choisir les matériaux les plus adaptés. Le choix des matériaux est une décision importante en termes de coût, de performances et d'empreinte carbone. En effet, une modification tardive, que ce soit en phase avancée de conception ou après le lancement en production, risque d'entraîner des dépenses très importantes. Les concepteurs doivent également savoir précisément où les matériaux sont utilisés dans leurs conceptions. Cette visibilité leur permet de repérer les cas où une mise à jour des caractéristiques d'un matériau pourrait justifier une adaptation de la conception.



Pour vous faire une idée du rythme auquel de nouveaux matériaux sont découverts, vous pouvez consulter le projet GNoMe 2023 de Google, qui a permis de découvrir 380 000 nouveaux matériaux stables. À titre de comparaison, seules 48 000 découvertes avaient été faites par les êtres humains avant cela. Veuillez consulter la page de ressources de cet ouvrage à l'adresse PTC.com/beyond-the-book pour obtenir un lien vers plus d'informations.

Répartir la fabrication

Les produits lourds et coûteux destinés aux marchés mondiaux sont particulièrement vulnérables aux frais de transport et aux droits de douane. Prenons l'exemple d'un constructeur automobile qui ne dispose que d'une seule usine d'assemblage à l'échelle mondiale : il doit faire venir deux tonnes de fournitures provenant de l'étranger, puis expédier une voiture de deux tonnes à ses clients, peu importe leur localisation. À ces frais logistiques s'ajoutent souvent des droits de douane élevés. Par ailleurs, une part importante des coûts de transport provient de la consommation de combustibles fossiles, ce qui alourdit non seulement la facture, mais aussi l'empreinte carbone des produits.

Grâce à la fabrication distribuée, les grands constructeurs automobiles implantent généralement leurs usines d'assemblage à proximité des marchés locaux, par exemple aux États-Unis, en Allemagne ou en Chine, tout en s'appuyant sur des chaînes logistiques locales. Cette approche permet de réduire à la fois les coûts et l'empreinte écologique. Elle offre aussi une meilleure résilience face aux perturbations de la chaîne logistique, qu'il s'agisse de cyclones, de hausses de droits de douane ou de conflits géopolitiques.



CONSEIL

La fabrication distribuée ouvre de nouvelles perspectives bien au-delà de l'industrie automobile. Tout fabricant proposant des produits lourds ou coûteux à l'international peut en bénéficier. Toutefois, vous devez prendre en compte les différences qui existent entre les gammes de produits fabriqués et les réseaux de distribution propres à chaque usine. La conception par modules, combinée à une bonne organisation de la production, permet de mieux maîtriser ces aspects complexes. Enfin, dans une logique d'économie circulaire, la refabrication pourrait prendre encore plus d'importance, notamment lorsque reprendre un produit existant s'avère plus simple que de le refabriquer entièrement.

Tester la fabricabilité

Pour les pièces fabriquées en interne (également appelées « *pièces maison* »), la maîtrise des coûts va généralement de pair avec la réduction de l'impact environnemental. La réduction des rebuts permet de réduire l'empreinte carbone, mais aussi de faire des économies sur les matériaux. L'efficacité énergétique permet non seulement de diminuer les factures d'électricité, mais contribue aussi à réduire notre impact environnemental, surtout quand l'énergie utilisée n'est pas à 100 % verte.

Pour un procédé de fabrication spécifique, les simulations permettent d'optimiser divers paramètres, comme la géométrie, les points de contrôle, le traitement et d'autres variables, dans le but de minimiser les rebuts et de réduire la consommation d'énergie. La simulation permet d'explorer différentes options de matériaux et de méthodes de production, dans le but d'optimiser les coûts tout en réduisant l'impact environnemental.

De plus, les tests de fabricabilité permettent d'anticiper l'impact environnemental lié à la production, un élément essentiel à inclure dans les déclarations de performance environnementale (EPD). Ainsi, vous n'aurez pas à effectuer cette analyse manuellement.

Automatiser les EPD

Les EPD et les bilans carbone des produits représentent un investissement considérable lorsqu'ils sont réalisés à la main. Les prix varient, mais ils se situent généralement entre 10 000 et 50 000 dollars. Non seulement les fabricants doivent faire face à des dépenses considérables

pour évaluer leurs différentes gammes de produits, mais ils se heurtent aussi à un manque de ressources humaines. En effet, il n'y a pas assez d'experts en environnement disponibles pour traiter la multiplication des demandes de PCF et d'EPD.



Heureusement, nous pouvons regrouper la plupart des données PCF dans des nomenclatures PLM précises, qui peuvent ensuite être intégrées dans des outils d'analyse du cycle de vie afin d'automatiser en grande partie la création des EPD. En ce qui concerne la durabilité, la nomenclature PLM permet de gérer les données d'inventaire du cycle de vie, qui sont ensuite utilisées par le logiciel d'ACV pour calculer l'analyse des impacts environnementaux. Ces résultats sont finalement incorporés dans une déclaration de performance environnementale (EPD). Le succès de cette démarche d'automatisation dépend avant tout d'une solide nomenclature PLM, qui englobe les spécificités des matériaux et pièces, les données fournisseurs, ainsi que tous les aspects environnementaux, qu'ils soient liés aux propriétés inhérentes ou à l'utilisation. Ensuite, un logiciel d'analyse du cycle de vie (ACV) traite ces données de nomenclature, effectue les calculs nécessaires et transmet les résultats de l'impact environnemental au système PLM.

Valeur de la circularité

L'objectif principal de la circularité est de préserver les ressources limitées. Le diagramme en papillon créé par la Fondation Ellen MacArthur est considéré comme la référence mondiale en matière d'économie circulaire. Bien que trop complexe pour être présenté ici, nous vous conseillons vivement de le consulter sur Internet. Pour plus d'informations, veuillez consulter le site PTC.com/beyond-the-book.

La circularité se caractérise par la gestion des flux de matières, qu'il s'agisse de ressources organiques (par exemple, des processus de compostage et de régénération) ou de matériaux non renouvelables. Dans le secteur de la fabrication discrète, nous nous concentrons essentiellement sur la transformation des produits finis, notamment les métaux, les minéraux, les céramiques et les plastiques. Au fur et à mesure, ce secteur adopte de plus en plus de biomatériaux et favorise le compostage responsable des matières renouvelables, notamment pour les pièces jetables ou soumises à une forte usure.



L'économie circulaire repose sur l'idée que le recyclage n'est pas une solution optimale pour notre société. La réparation, la réutilisation, la reconditionnement et la refabrication sont des options à privilégier avant d'envisager le recyclage. En ce qui concerne l'économie, examinons le concept de *Value Hill* (pyramide de valeur) développé par Circle Economy et présenté dans la figure 3-3. Il démontre que l'économie circulaire s'aligne parfaitement avec les objectifs commerciaux.

Les produits traditionnels suivent un parcours linéaire : de l'extraction des matières premières à leur transformation, en passant par la fabrication et l'assemblage, jusqu'à leur acheminement vers les magasins, puis chez le client final. En cas de défaut ou lorsque le client n'en a plus l'utilité, jeter le produit anéantit sa valeur à cinq niveaux différents. Il vaut mieux préserver et optimiser la valeur d'un produit en privilégiant, dans l'ordre, sa réparation, sa réutilisation, son reconditionnement, sa refabrication et enfin son recyclage.

Il va de soi que le véritable enjeu est d'assurer la rentabilité de cette démarche, qui ne peut être atteinte qu'avec une planification et une mise en œuvre rigoureuses.

Rendez-vous sur [PTC.com/beyond-the-book](https://www.ptc.com/beyond-the-book) pour plus d'informations sur la Value Hill.

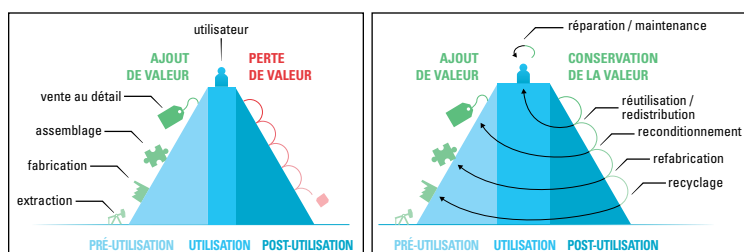


FIGURE 3-3 : La Value Hill montre comment l'économie circulaire s'aligne avec les objectifs commerciaux.

Conception modulaire



La modularité crée à la fois l'offre et la demande en matière de réutilisation, de reconditionnement et de refabrication des pièces. Elle favorise aussi les approches traditionnelles, ce qui permet aux utilisateurs de prolonger la durée de vie des produits, de les maintenir en bon état et de les transmettre sur plusieurs générations.

Les grandes marques de jouets qui règnent sur le marché depuis des années doivent leur succès à leurs jeux modulaires. Il y a deux marques de jouets qui ont marqué toute mon enfance et qui ont aussi fait le bonheur de mes enfants, au point qu'ils tiennent à les garder pour leurs propres enfants (d'où notre grenier plein à craquer) : LEGO et Playmobil. Ces deux entreprises offrent des conceptions modulaires exceptionnelles, ce qui permet à chacun de réinventer son produit selon ses désirs. La phase pirate est terminée ? Vous pouvez ensuite démonter les modules pour créer une station spatiale. Les gens jettent rarement leurs LEGO ou leurs Playmobil.

L'industrie automobile a été l'une des pionnières dans l'adoption de la conception modulaire. De nos jours, il suffit de visiter le site web d'un constructeur pour personnaliser sa voiture selon ses envies (choix du moteur, de la teinte, des jantes, du toit panoramique, des antibrouillards, des sièges sport, du système audio sophistiqué, etc.). Cette approche répond non seulement aux attentes des clients en matière de personnalisation, mais permet aussi aux constructeurs de gérer efficacement leur réseau de pièces détachées grâce à une standardisation intelligente des pièces. Ce système modulaire leur permet de séduire une clientèle plus large tout en optimisant la rentabilité du service après-vente. Même en fin de vie, une voiture conserve sa valeur marchande puisqu'elle est conçue pour être démontée, ce qui permet la réutilisation des pièces en bon état et le recyclage optimal des matériaux restants.

La conception modulaire est essentielle pour optimiser la valeur circulaire au-delà du simple recyclage. En tant qu'expert du cycle de vie, je constate que cette approche modulaire doit intégrer harmonieusement les logiciels, le matériel et l'électronique. Par exemple, une batterie conçue de façon modulaire nécessite un logiciel adapté pour être compatible avec différents produits. La gestion efficace de ces systèmes modulaires passe par une nomenclature d'étude unifiée dans le système PLM, enrichie par des composants logiciels ALM modulaires. Cette modularité se décline ensuite dans tous les aspects : de la fabrication à la maintenance, en passant par le démontage, jusqu'aux instructions destinées aux opérateurs de première ligne.

Envoyer des techniciens en dernier recours

Pour maintenir votre position au sommet de la pyramide de valeur (comme évoqué dans la partie « Valeur de la circularité »), vous devez concevoir des produits réparables. Cette approche présente un double avantage : elle prolonge la durée de vie des produits tout en permettant de développer une activité de services rentable qui stimule la croissance de l'entreprise.

De nos jours, les constructeurs ne se limitent plus aux garanties standard ; ils proposent une gamme complète de services après-vente, allant des contrats d'entretien au leasing, en passant par des accords basés sur la performance. Face à l'augmentation des coûts liés aux services dans le secteur manufacturier, l'enjeu principal est d'optimiser la rentabilité en privilégiant les canaux de distribution les plus économiques. Fort heureusement, les solutions permettant de réduire les coûts des services, comme indiqué dans le tableau 3-1, correspondent parfaitement à notre volonté de diminuer notre impact environnemental.



À chaque niveau, des instructions précises doivent correspondre à la configuration en place. Sans cela, la modularité des produits complique le travail des techniciens de première ligne, qui doivent gérer des produits différents d'une intervention à l'autre. Vous optimiserez votre temps et vos ressources grâce au filtrage des listes de pièces et des protocoles d'utilisation et de maintenance selon la configuration adéquate. Ces procédures de maintenance, essentielles à l'économie circulaire, doivent aussi couvrir le démontage et la récupération des pièces et matériaux.

TABEAU 3-1 Options de prestation de services

Canal de service	Coût constructeur	Empreinte
Libre-service	\$ Aucun ou centre d'appels	Négligeable
Réparation à distance	\$\$ Mise à jour logicielle en direct	Négligeable
Réparation lors de la première visite	\$\$\$ Envoi de techniciens, pièces détachées	Kilométrage des camions, carbone intégré dans les pièces
Visites répétées	\$\$\$\$\$ Envois de techniciens et pièces détachées supplémentaires	Augmentation du kilométrage des camions, carbone intégré dans les pièces

Les logiciels embarqués jouent un rôle essentiel dans le libre-service et le support technique, notamment grâce aux alertes et notifications détaillées qu'ils fournissent. De plus, ils représentent l'unique solution pour effectuer des interventions à distance, puisque les techniciens ne peuvent évidemment pas se déplacer physiquement pour remplacer des pièces.

Pour la maintenance sur site, les approches centrées sur les actifs sont bien plus efficaces que l'envoi de techniciens sur rendez-vous. En tirant parti de l'intelligence embarquée des produits, elles évitent les déplacements inutiles. Elles privilégient donc les solutions en libre-service ou l'assistance à distance. Lorsqu'une intervention physique devient inévitable, les besoins en pièces détachées sont anticipés et coordonnés à distance pour optimiser la réparation et éviter les allers-retours. Ce fonctionnement permet également de regrouper de manière stratégique les urgences avec les opérations de maintenance planifiée.

Commander des pièces de rechange en dernier recours



Les réseaux de pièces détachées représentent un enjeu stratégique, à la fois économique et environnemental. Pour un fabricant d'équipements durables dont le chiffre d'affaires atteint un milliard de dollars, il est fréquent que le stock de pièces soit évalué à plusieurs dizaines, voire à plusieurs centaines de millions de dollars.

Une gestion optimisée des stocks à plusieurs niveaux depuis les entrepôts centraux jusqu'aux véhicules de livraison, en passant par les zones de stockage intermédiaires, repose sur l'analyse des données historiques de la demande. Grâce à cette approche, les entreprises peuvent réduire sensiblement les coûts de stockage tout en améliorant la qualité du service. Par ailleurs, les données issues du cycle de vie des produits (PLM) et des objets connectés offrent des leviers supplémentaires pour diminuer à la fois les coûts et l'impact environnemental. En effet, des informations précises sur la localisation des équipements, les engagements contractuels, les configurations et l'état des produits donnent aux gestionnaires de pièces détachées les moyens d'ajuster les niveaux de stock de façon précise et de limiter le recours aux livraisons urgentes.

De plus, les boucles de retour des pièces modulaires circulaires peuvent faire l'objet d'un suivi précis à chaque étape. La gestion des disques de frein en est un exemple concret, car leur retour en réusine s'effectue dans un délai de réapprovisionnement de dix jours. Grâce à cette visibilité, les équipes peuvent ajuster les achats auprès des fournisseurs et éviter toute commande superflue pour des besoins au-delà de cette période. Vous pouvez également mesurer les économies financières et l'empreinte écologique réalisées grâce à ces achats évités dans le cadre de vos opérations de réutilisation, de reconditionnement et de refabrication. La réduction de l'empreinte carbone associée représente une valeur de circularité tangible et vérifiable sur le plan financier.

Différenciation des produits en termes d'empreinte écologique

Un nombre croissant de consommateurs accepte de payer plus pour des produits respectueux de l'environnement. Ces revenus sont appelés « *prime verte* ». Ce phénomène concerne autant les particuliers sensibles aux enjeux écologiques que les entreprises engagées dans une démarche de neutralité carbone. Alex McQueen, analyste chez ABI Research : « Les consommateurs accordent désormais une importance grandissante aux critères de durabilité dans leurs décisions d'achat. Pour répondre à ces attentes, de plus en plus d'entreprises intègrent les analyses du cycle de vie à leur stratégie environnementale. »



CONSEIL

De plus, les gouvernements subventionnent parfois les approches ou les produits plus écologiques. Tirez parti des primes écologiques et des subventions gouvernementales, mais gérez-les comme des contributeurs dynamiques à votre analyse de rentabilité.

- » Intégrer la valeur de l'éco-conception dans le cycle de vie
- » Tirer les leçons de l'éco-conception
- » Élaborer un cadre d'éco-conception adapté aux spécialistes du cycle de vie
- » Étudier le séquençage en conditions réelles

Chapitre 4

Principes d'éco-conception

Dans ce chapitre, je présente les principes fondamentaux de l'éco-conception (Design for Sustainability, DfS) une approche qui vise à concevoir des produits tout en limitant leur impact sur l'environnement et sur la société. J'approfondis également cette discipline et je vous propose un cadre synthétique d'éco-conception destiné aux sous-traitants en fabrication.

Importance de l'éco-conception dans le cycle de vie

Environ 80 % de l'empreinte d'un produit se joue dès la phase de conception. C'est pourquoi les décisions prises à ce stade influencent fortement l'impact environnemental global. Toute modification ultérieure, qu'elle concerne les matériaux, les fixations, la géométrie, les processus de fabrication, les logiciels, les plans de service ou encore les modèles commerciaux, entraîne des coûts de plus en plus élevés à mesure que le développement progresse.

Faire dès le départ les bons choix en matière d'éco-conception permet donc d'éviter des ajustements complexes et onéreux par la suite.

La quête d'une éco-conception responsable

À ce jour, aucun guide ne permet de concevoir des produits discrets de manière durable. Cette lacune a motivé la rédaction de cet ouvrage. Malgré l'absence de référence consolidée, des ressources de qualité existent, car l'éco-conception bénéficie aujourd'hui d'un intérêt croissant et de

financements solides. Cette section présente les principales sources que j'utilise régulièrement.

L'ensemble de normes ISO 14000 traite des enjeux liés à l'éco-conception, mais la plupart de ses textes s'adressent à des niveaux organisationnels élevés. Parmi elles, la norme ISO 14001, dédiée aux systèmes de management environnemental, se distingue par ses certifications à plusieurs niveaux et une large adoption par des milliers d'entreprises. Elle constitue une base solide pour structurer les démarches, tout en restant peu adaptée aux aspects concrets de la conception de produits discrets.

Pour orienter les premières phases de conception, la roue des stratégies de conception du cycle de vie (LiDS) représente un outil de référence simple et rapide à utiliser. Le chapitre 5 présente cette méthode plus en détail.

Enfin, pour accéder à des recommandations plus structurées, le cadre « Design for X » (Conception pour X) regroupe de nombreuses approches ciblées, élaborées par une grande diversité de contributeurs. On y trouve aussi bien des contenus en accès libre que des ressources payantes. Le tableau 4-1 répertorie les disciplines connexes qui complètent utilement ces approches.

TABLEAU 4-1 Méthodes de conception durable

Méthode DfX	Objectif lié à la durabilité
Assemblage (DfA)	Faciliter la fabrication et la réparation.
Circularité (DfC)	Ajuster les modèles commerciaux et les facteurs humains afin de favoriser la récupération des matériaux.
Désassemblage (DfD)	La facilité de réparation et de retour en fin de vie favorise la longévité des produits.
Efficacité énergétique (DfEE)	Réduire la consommation énergétique et les consommables de vos produits.
Logistique (DfL)	Contrôler les achats de pièces de rechange, les frais d'expédition et l'empreinte écologique.
Longévité (DfLG)	Gérer les pièces à forte et faible usure pour prolonger la durée de vie des produits et réduire les déchets.
Fabrication (DfM)	Réduire les déchets et la consommation d'énergie.
Recyclage (DfR)	Favoriser la séparation des matériaux et leur réutilisation à forte valeur ajoutée ou récurrente.
Réusinage et reconditionnement (DfRM-DfRF)	Donner plusieurs cycles de vie aux produits pour créer des modules et des pièces durables.
Réparation et maintenance (DfR-DfM)	Prolonger la durée de vie du produit.

Méthode DfX	Objectif lié à la durabilité
Réutilisation et réaffectation (DfRR)	Planifier une utilisation secondaire (exemple : pneus usés afin de les transformer en amarres pour quais).
Comportement durable (DfSB)	Encourager les utilisateurs finaux à utiliser, éliminer et retourner les produits de manière responsable.
Utilisation (DfU)	Équilibrer la consommation d'énergie et de consommables avec la durée de vie des produits.

Outre les approches présentées, comme la série de normes ISO 14000, la roue LiDS ou le cadre Design for X, d'autres ressources méritent également votre attention. Vous trouverez des ouvrages spécialisés, des blogs thématiques, des communautés professionnelles et des outils pratiques à l'adresse suivante : [PTC.com/beyond-the-book](https://www.ptc.com/beyond-the-book).

Cadre d'éco-conception pour les sous-traitants en fabrication

Ce cadre d'éco-conception rassemble l'essentiel des travaux de recherche DfS évoqués dans la section précédente et les organise sous la forme d'une matrice de maturité de niveau intermédiaire. Ce format s'adresse directement aux professionnels impliqués dans la gestion du cycle de vie des produits. La matrice comporte trois niveaux distincts, chacun correspondant à un degré de maturité spécifique. Les caractéristiques propres à chaque niveau sont décrites dans cette section.

La figure 4-1 vient compléter cette présentation en illustrant les trois niveaux ainsi que les interactions qui les relient.

Niveau des pièces

Pour les pièces que vous concevez vous-même, veuillez tenir compte des considérations suivantes afin de réduire leur empreinte écologique :



RAPPEL

» **Choisissez les meilleurs matériaux.** Au-delà des seules caractéristiques techniques, comme la résistance, d'autres propriétés des matériaux doivent entrer en ligne de compte : l'intensité des émissions de carbone, la consommation d'eau, le pourcentage de contenu recyclé, la part recyclable, la toxicité, la conformité des fournisseurs ainsi que le coût. Pour accompagner cette évaluation, l'intégration de bases de données commerciales sur les matériaux permet de simplifier la sélection et d'assurer la cohérence avec les matériaux validés par l'entreprise. Une diversité trop importante de matériaux peut compliquer le tri en fin de vie, notamment pour les filières de recyclage. En revanche, cette diversité peut s'avérer compatible avec des stratégies fondées sur le réusinage.

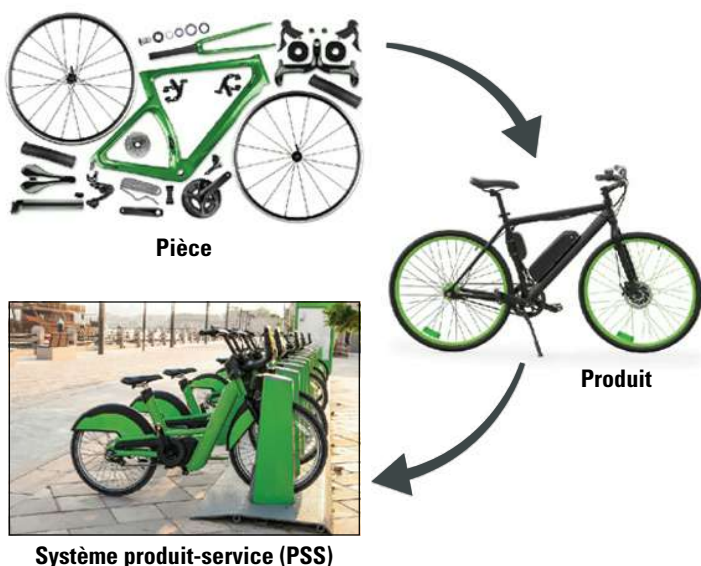


FIGURE 4-1: DfS maturity levels for discrete manufacturing.

- » **Utilisez le moins possible le matériau choisi.** Optimisez l'utilisation des matériaux tout en respectant les exigences de performance, les dimensions et l'aspect visuel. La conception générative et la fabrication additive sont des technologies complémentaires qui peuvent faciliter votre projet.
- » **Choisissez le meilleur processus de fabrication.** Ce point paraît simple en apparence, mais des évaluations approfondies peuvent conduire à revoir certains choix initiaux. Il peut alors devenir nécessaire de réexaminer les matériaux sélectionnés, la géométrie des pièces ou encore les caractéristiques de contrôle. Pour appuyer ces ajustements, la simulation de la fabricabilité et l'estimation des coûts jouent un rôle essentiel. Ces outils permettent d'affiner les prévisions et d'identifier des pistes concrètes d'amélioration.

À ce stade, la conception assistée par ordinateur (CAO) constitue un système intégré qui permet d'optimiser la transition numérique en s'appuyant sur les données de la chaîne logistique (notamment les bases de données de matériaux) et sur des simulations avancées, que ce soit pour la conception générative, l'analyse des performances ou la fabricabilité.

Niveau des produits

Ce niveau vise à optimiser les produits en concentrant les efforts sur leur cycle de vie initial. L'analyse porte sur l'ensemble des étapes allant de l'extraction des matières premières jusqu'à la sortie d'usine. Cette phase, souvent désignée sous le terme « du berceau à la porte », constitue un

levier essentiel pour réduire l'impact environnemental dès la conception. Les points essentiels à prendre en compte sont les suivants :

- » **Analyse des points sensibles** : l'étude des points sensibles en matière d'impacts environnementaux permet d'identifier et de quantifier les phases du cycle de vie d'un produit qui affectent le plus la durabilité, que ce soit en termes d'émissions carbone, d'utilisation d'eau ou de toxicité. Cette approche centrée sur le produit offre l'avantage de prioriser les actions de réduction de l'empreinte écologique là où les gains potentiels sont les plus significatifs.
- » **Fournisseurs respectueux de l'environnement** : choisir des fournisseurs proposant des matériaux et des pièces à faible impact environnemental permet de diminuer les émissions Scope 3.1. Les utilisateurs de solutions PLM (gestion du cycle de vie des produits) sont surtout concernés par les pièces achetées, puisque le choix des fournisseurs de matières premières relève généralement des équipes achats. L'évaluation de l'empreinte carbone se fait selon les mêmes critères que pour les matériaux, mais les données fournies par les fournisseurs sont habituellement calculées à l'échelle des pièces plutôt que des matériaux.
- » **Fabrication distribuée** : pour les produits lourds destinés à une clientèle internationale, la localisation de la production peut permettre de réduire les coûts et l'empreinte écologique. Cependant, elle peut également entraîner une complexité accrue, notamment en raison de la modularité des produits et de la spécificité des chaînes logistiques et des lignes de production de chaque site. Pour faciliter le travail des concepteurs et des opérateurs, les nomenclatures PLM peuvent créer automatiquement des listes de pièces, des gammes de fabrication et des instructions adaptées à chaque site de production et à chaque variante de produit.
- » **Fonctionnement efficace** : l'allègement, l'électrification et le réglage thermique sont des méthodes qui permettent d'améliorer le rendement énergétique des produits. Les nomenclatures PLM identifient les possibilités d'allègement à réaliser grâce aux capacités de conception générative de la CAO. D'autres analyses d'efficacité énergétique sont généralement effectuées à l'aide de simulations intégrées dans les processus PLM.

Le système PLM représente la solution numérique par excellence pour gérer l'éco-conception des produits. Il s'interface naturellement avec les outils d'analyse du cycle de vie, les données de la chaîne logistique et les systèmes de CAO pour optimiser les pièces.

Niveau du système de service produit

Les systèmes de services produits associent des produits à des services afin de répondre aux besoins des clients. Ils accompagnent l'intégralité

du cycle de vie, depuis la conception du produit jusqu'à la valorisation des matériaux. Avec un modèle économique basé sur le partage des risques et incluant le produit lui-même, ce niveau requiert une attention particulière aux éléments suivants :

- » **Prolongation de la durée de vie initiale du produit.** Un produit doit avoir une durée de vie suffisante pour permettre aux utilisateurs d'optimiser sa valeur par rapport aux coûts de service et à la valeur de revente de l'actif. Cette démarche nécessite une planification des services, y compris une analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE), des réseaux de pièces de rechange, des catalogues de pièces, des procédures de service et une couverture technique.
- » **Optimisation du système de fin de vie.** Les pièces et produits en fin de vie bien planifiés doivent conserver leur valeur dans l'ordre de priorité suivant : réutilisation, remise à neuf, refabrication et recyclage.

La gestion du cycle de vie des applications (ALM), la gestion du cycle de vie des services (SLM) et l'Internet des Objets (IoT) sont des ajouts importants pour les entreprises qui évoluent vers des systèmes de services produits. Le SLM pilote les processus de service et peut être étendu de manière raisonnable pour faciliter les boucles de retour des matériaux. L'ALM améliore le rendement des services et la récupération des matériaux grâce à des logiciels embarqués compatibles avec l'IoT. Les produits connectés à l'IoT offrent des fonctionnalités de géolocalisation, de mises à jour en direct, de triage à distance, d'alerte, de guidage de l'opérateur, de suivi des retours, etc.

Gestion du séquençage de l'éco-conception dans le monde réel

Même si le processus de maturation du cadre évolue naturellement du composant au produit, puis au système de services, les entreprises adoptent généralement l'éco-conception selon un cheminement qui leur est propre. Les entreprises bien établies préfèrent commencer au niveau du produit, avec les nomenclatures PLM. Vu les nouvelles réglementations environnementales, les entreprises doivent d'abord mesurer l'empreinte de leurs différents produits, qui contiennent chacun des centaines ou des milliers de pièces. Pour diminuer leur empreinte, elles peuvent ensuite classer les pièces les plus cruciales (déterminez le pourcentage qui correspond à vos besoins) et les intégrer au niveau des pièces pour réduire les coûts et l'empreinte écologique.

Les start-ups et les nouvelles plateformes numériques qui s'aventurent dans l'industrie traditionnelle débutent généralement par une offre de services associés à des produits. Les obstacles à la création d'une entreprise à ce stade sont minimes, car tout est à faire, et les résultats permettent de se démarquer de la concurrence existante.

- » Découvrir les lignes directrices relatives à l'approche du cycle de vie
- » Mettre de l'ordre dans vos priorités
- » Découvrir la continuité numérique du cycle de vie
- » Intégration de la nomenclature PLM et du centre d'actifs

Chapitre 5

Gestion de l'empreinte écologique grâce à une approche axée sur la totalité du cycle de vie

Au final, l'économie circulaire s'imposera comme la solution pour le secteur de la fabrication discrète. Nos industries affichent aujourd'hui un taux de circularité inférieur à 10 % en moyenne, il y a donc beaucoup à faire.

L'économie circulaire apporte une solution concrète à l'épuisement des ressources en permettant de réutiliser les mêmes matériaux encore et encore. Elle permet aussi d'éviter des reprises énergivores dans la chaîne logistique tout en assurant une utilisation sécurisée des matériaux. La circularité peut donc contribuer à relever deux autres défis majeurs : la décarbonation et le contrôle des matières dangereuses.

Il ne suffit plus de réduire l'impact environnemental des produits en se limitant aux étapes allant de l'extraction des matières premières jusqu'à leur fabrication, approche appelée « *cradle-to-gate* » (du berceau à la porte) dans le secteur de la durabilité. Les spécialistes du cycle de vie doivent considérer la valeur de leurs solutions sur plusieurs générations. Ils doivent en examiner tous les aspects : l'utilisation, la maintenance, la réutilisation et la valorisation des matériaux, selon le principe du « *cradle-to-cradle* » (berceau au berceau).



RAPPEL

Les offres doivent accompagner les produits pour pouvoir fidéliser les clients.

Dans ce chapitre, vous découvrirez les processus et les cadres numériques qui permettent de gérer l'ensemble du cycle de vie. La bonne nouvelle, c'est que nous n'allons pas tout chambouler, mais simplement

enrichir vos méthodes actuelles de gestion numérique des produits. La durabilité n'est qu'un aspect supplémentaire de la création de valeur.

Lignes directrices relatives à l'approche du cycle de vie

Avoir une vision claire et des lignes directrices sur la durabilité dès le début du processus de conception s'avère extrêmement précieux. La roue LIDS (stratégies de conception du cycle de vie), représentée dans la figure 5-1, constitue un outil précieux pour analyser et comprendre les différentes étapes du cycle de vie. Le cadre LIDS offre aux concepteurs des règles générales pour le cycle de vie dans le sens des aiguilles d'une montre, en attribuant une note à la conception pour chacun des huit domaines (plus la note est élevée, plus l'adoption est importante). Chaque recommandation semble évidente, mais il est important de considérer le système dans son ensemble lors des premières décisions concernant la conception.

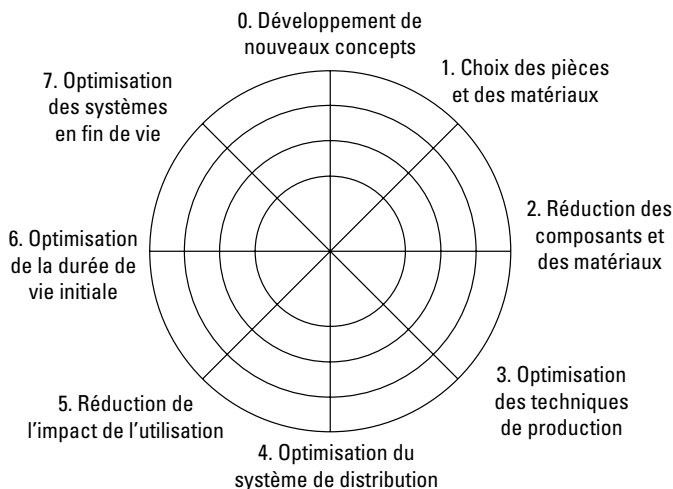


FIGURE 5-1 : La roue LIDS.

Pour plus d'informations sur la roue LIDS, consultez le site [PTC.com/beyond-the-book](https://www.ptc.com/beyond-the-book).

Pour mieux adopter cette approche du cycle de vie, intégrez des critères d'éco-conception directement dans vos processus de gestion des besoins. C'est la meilleure façon de s'assurer que les choses sont correctement effectuées dès le départ. Ces modèles de spécifications peuvent être utilisés de manière générale, puis personnalisés selon les besoins particuliers de chaque produit. Le contrôle des spécifications via des tests, des

conceptions et des fonctionnalités système nous permet de nous assurer que les concepteurs appliquent les principes d'éco-conception les plus pertinents dans leurs systèmes de service produit (en d'autres termes, vous vous assurez que tout est bien fait).

Les entreprises qui adoptent l'étude des systèmes basée sur les modèles peuvent désormais intégrer des critères environnementaux précis dès la phase initiale de conception. Ces critères comprennent notamment l'empreinte carbone, la quantité de carbone incorporé, la consommation en eau et en énergie, le poids pour les objets mobiles, ainsi que le niveau de toxicité. Tous ces paramètres sont directement associés aux modèles systémiques dès le début du processus. Les équipes peuvent ainsi définir des objectifs précis pour chaque sous-système, avec la possibilité de les ajuster ou de les rediscuter à l'échelle globale du système si besoin. Plus tard, les systèmes de gestion du cycle de vie des produits (PLM), des applications (ALM), de conception électronique assistée par ordinateur (ECAD) et d'autres outils de support pourront compiler les données pour s'assurer que les objectifs environnementaux sont respectés dans l'ensemble du système.

Priorités en matière d'inventaire du cycle de vie

La figure 5-2 permet d'établir un langage commun entre les spécialistes du cycle de vie des produits et les experts en durabilité.

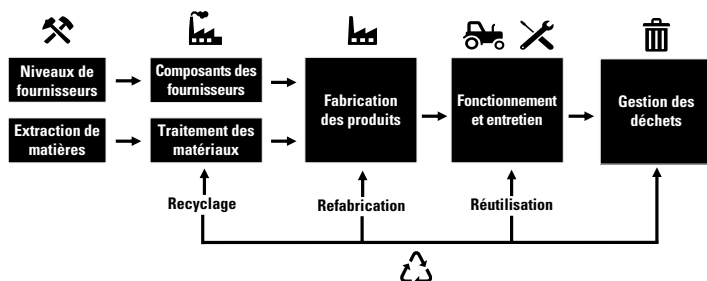


FIGURE 5-2 : L'inventaire du cycle de vie.

Les spécialistes de l'analyse du cycle de vie répertorient les pièces, qu'elles soient produites en interne ou achetées auprès de fournisseurs, qui convergent vers l'usine pour le montage du produit final, puis suivent son parcours jusqu'au service après-vente et à sa fin d'utilisation.

Les spécialistes de la durabilité créent un schéma détaillé qui répertorie toutes les étapes du cycle de vie d'un produit. Ce schéma permet d'identifier les activités ayant un impact sur l'environnement, pour ensuite les analyser et évaluer précisément l'empreinte écologique globale du produit.

Cette section détaille les quatre catégories du cycle de vie présentées dans la figure 5-2.

Empreinte opérationnelle

La première partie de la figure 5-2 à analyser est la fabrication, comme le montre la figure 5-3.



Fabrication des produits

FIGURE 5-3 : La phase opérationnelle du cycle de vie : fabrication.

Pensez à vos installations comme étant votre empreinte industrielle. Instinctivement, on pourrait croire que c'est l'usine qui a l'impact le plus significatif et qui devrait être traitée en priorité. Après tout, elle émet des gaz d'échappement et de la chaleur, et produit aussi des déchets métalliques et des matières dangereuses. Mais en fait, l'usine a un impact étonnamment faible sur l'environnement et n'est pas vraiment une priorité dans notre travail, pour deux raisons essentielles.

- » Elle ne représente généralement que 1 à 10 % de l'empreinte d'un produit discret. La fabrication discrète repose essentiellement sur des opérations de transformation et d'assemblage qui nécessitent relativement peu d'énergie, contrairement aux activités comme l'extraction minière, le traitement des matières premières et autres processus industriels en amont et en aval.
- » L'une des solutions majeures adoptées par les usines pour réduire leurs émissions de carbone consiste à convertir leurs équipements de production à l'électricité, bien que cette initiative demande d'importants investissements financiers. Par ailleurs, l'usine peut utiliser de l'énergie verte, que ce soit via des panneaux solaires, un contrat d'achat d'électricité virtuel ou d'autres solutions d'investissement que votre service financier pourra mettre en place. **Remarque :** pour les applications industrielles nécessitant de la chaleur, l'hydrogène s'impose de plus en plus comme une alternative au gaz naturel, notamment grâce à la possibilité de le produire à partir d'énergies renouvelables. Les équipements dotés de brûleurs hybrides fonctionnent au gaz naturel et peuvent basculer vers l'hydrogène dès que celui-ci est accessible.

Les experts en gestion du cycle de vie des produits s'intéressent bien aux aspects liés à l'impact environnemental industriel, mais surtout en optimisant la conception pour faciliter la fabrication, réduire les déchets et

minimiser la consommation énergétique. Cette démarche comprend l'usinage ainsi que les consignes de réglage destinées aux techniciens de première ligne. La fabrication distribuée peut aussi être privilégiée lors de la conception pour raccourcir les distances d'approvisionnement.

Empreinte carbone en amont

La deuxième partie de la figure 5-2 à analyser concerne les étapes en amont, c'est-à-dire les deux premières sections, qui sont illustrées à la figure 5-4.

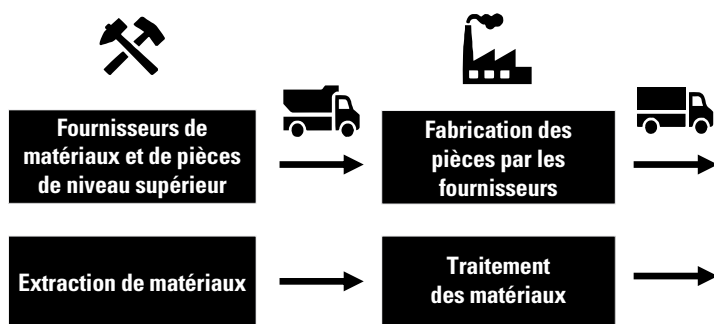


FIGURE 5-4 : Étapes en amont de l'empreinte carbone.

Pour la majorité des sous-traitants spécialisés dans la fabrication discrète, les pièces et matériaux livrés à votre quai de réception constituent entre 75 et 90 % de l'empreinte totale de vos produits finis. Imaginons une pièce faite d'une tige en acier. Le minerai de fer provient d'une région isolée, d'où d'imposants blocs de roche sont acheminés par camion sur plusieurs kilomètres jusqu'à l'aciérie. Là, ils sont transformés en barres d'acier avant d'être transportés par la route jusqu'à notre usine. Ces opérations consomment énormément d'énergie, fournie essentiellement par les énergies fossiles dans notre système économique actuel. Qu'est-ce que vous faites avec cette barre d'acier dans votre atelier ? Disons que vous la pliez et la vissez dans un assemblage, ce qui demande assez peu d'efforts.

Et ce ne sont pas seulement les métaux lourds et les pièces qui génèrent une empreinte en amont. Les pièces électroniques plus légères et d'apparence inoffensive peuvent être bien plus nocifs. Dans un ordinateur portable, le processeur peut générer plus de carbone et de déchets que le boîtier, plus grand et plus lourd, ou même que la batterie. Les pièces électroniques contiennent des métaux rares dont la concentration ne représente généralement que 5 à 10 % du poids du minerai extrait, qui doit ensuite subir un traitement supplémentaire pour extraire 50 à 70 % des métaux rares contenus dans le concentré.

Votre responsable en matière de durabilité constate que vos émissions de type Scope 3.1 pour vos « Biens et services achetés » en amont sont

élevées. Cette empreinte considérable de vos produits n'est pas seulement un enjeu environnemental majeur, mais elle est aussi soumise à des contraintes réglementaires qui vous poussent à la diminuer. D'après les études scientifiques actuelles, il faudra la réduire d'au moins un quart d'ici 2030. En tant que spécialiste de la gestion du cycle de vie des produits, vous concentrerez surtout vos actions de réduction d'impact environnemental sur les phases initiales de conception et de production. C'est aussi le secteur où vos responsables de la durabilité vous incitent fréquemment à prendre des mesures immédiates.

Empreinte carbone en aval

La troisième partie de la figure 5-2 à analyser concerne les étapes en aval du cycle de vie. Ce processus linéaire correspond aux deux dernières sections de la figure, comme le montre la figure 5-5.

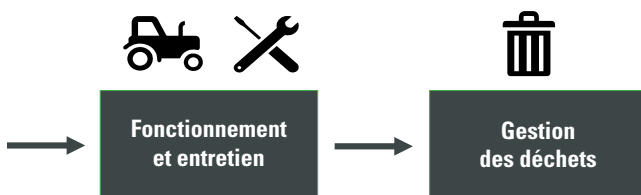


FIGURE 5-5 : Étapes en aval du cycle de vie : un processus linéaire.

Les fabricants doivent aussi assumer leurs responsabilités quant aux conséquences de leurs produits après la vente, notamment en ce qui concerne la consommation d'énergie, l'utilisation des services et la gestion des déchets qui en découlent. Si vous commercialisez un produit qui consomme beaucoup d'énergie, l'impact carbone lié à son utilisation par vos clients (Scope 3.11) risque d'être considérable. Elle pourrait même dépasser votre impact environnemental direct (c'est généralement plus de 95 % de l'empreinte carbone totale pour les constructeurs automobiles et les fabricants d'équipements). Selon le type de carburant que vous utilisez, vous devrez probablement agir rapidement sur ce point.

Si votre produit fonctionne à l'électricité ou avec une autre source d'énergie de plus en plus verte, vous avez un avantage certain. Bien que vos émissions indirectes (Scope 3.11) liées à la consommation d'électricité de vos clients soient importantes aujourd'hui, notamment à cause des centrales à charbon et à gaz, la situation devrait s'améliorer considérablement d'ici 2050 avec le verdissement progressif des réseaux électriques. Vous avez ainsi l'opportunité de diminuer vos émissions Scope 3.11.



ATTENTION

Toutefois, si votre produit est alimenté par des combustibles fossiles, vous ne pourrez pas atteindre la neutralité carbone sans passer à une source renouvelable. Les possibilités d'amélioration du rendement des combustibles fossiles sont limitées. Votre objectif est d'électrifier ou de passer à une autre source d'énergie renouvelable, comme la technologie

de l'hydrogène. Quelques secteurs, comme l'aéronautique long-courrier, ne disposent pas encore de technologies à grande échelle pour remplacer les combustibles fossiles, mais la plupart le peuvent.

Si votre activité implique la vente de produits nécessitant un service après-vente important, n'oubliez pas que d'autres éléments ont un impact significatif sur votre bilan carbone : le transport routier, la gestion des pièces détachées, les consommables, ainsi que l'acheminement des pièces (particulièrement lorsqu'il se fait par voie aérienne plutôt que par transport terrestre classique). Toutefois, l'impact environnemental global demeure nettement moins important que celui des activités en amont. *Remarque* : votre inventaire de pièces détachées représente une empreinte carbone importante en amont. Il est donc essentiel de minimiser ces coûts de transport qui pèsent lourd dans le bilan.

Circularité

La dernière partie de la figure 5-2 à analyser concerne les étapes circulaires du cycle de vie en aval, qui constituent une section combinée de la figure 5-2, comme le montre la figure 5-6.

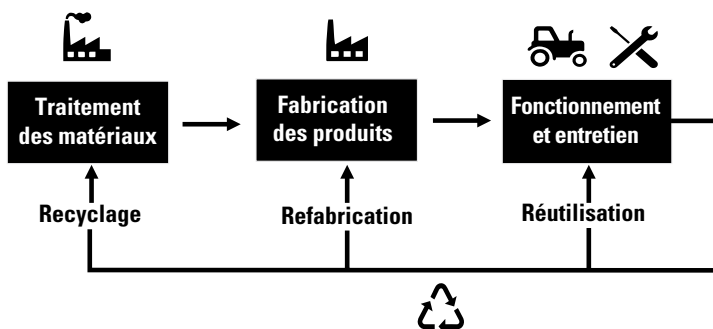


FIGURE 5-6 : Étapes en aval du cycle de vie (processus circulaire).



Même si votre priorité est sans doute de réduire votre impact environnemental initial, la meilleure solution pour atteindre vos objectifs tout en restant rentable est d'adopter une approche circulaire plus dynamique. Prenons l'exemple d'un ordinateur portable. Un PC portable reconditionné offre les mêmes performances et garanties qu'un modèle neuf, tout en ayant un impact environnemental nettement plus faible. En effet, son empreinte carbone représente à peine 10 % de celle d'un ordinateur neuf, ce qui en fait une option particulièrement écologique pour les raisons suivantes :

» **Réutilisation** : la production initiale du châssis en aluminium de l'ordinateur portable a demandé une consommation d'énergie considérable. Néanmoins, sa conception traditionnelle et sa robustesse en font un excellent choix. Il se peut que vous ne voyiez aucune différence entre un châssis tout neuf et un autre qui a déjà 5 ans. Du coup,

on peut réutiliser le châssis sans problème. Nul besoin d'extraire à nouveau de la bauxite pour la convertir en aluminium et ensuite fabriquer des coques d'ordinateurs portables.

- » **Réusinage** : le clavier du portable fonctionne encore parfaitement bien après 5 ans d'utilisation. La touche Q est encore en bon état, mais les touches des voyelles sont complètement usées et il faudrait soit les rénover, soit changer leurs ressorts. Le plastique peut être utilisé tel quel, sans nécessiter de recyclage, de transformation ou de moulage. Le clavier n'a besoin que de quelques petites retouches pour être remis à neuf et retrouver ses performances d'origine.
- » **Recyclage** : la carte mère n'est plus assez performante au niveau de sa rapidité. Dans ce cas, la solution la plus pertinente consiste à la démonter, à séparer les matériaux, puis à en fabriquer une nouvelle à partir de pièces récupérées. Cette approche permet d'éviter les coûts élevés associés à l'extraction de métaux rares.

En combinant les trois flux (réutilisation, reconditionnement et recyclage), le rendement carbone peut atteindre 90 % pour les ordinateurs portables remis à neuf. À cela s'ajoutent des bénéfices notables, notamment la préservation des métaux rares et la réduction des risques liés aux déchets électroniques dangereux. Le reconditionnement offre également un avantage environnemental significatif dans d'autres secteurs verticaux. Selon les fabricants avec lesquels j'ai collaboré, les gains en empreinte écologique varient de 60 à 95 %, en fonction des pratiques mises en œuvre.

La continuité numérique du cycle de vie

Apprendre les principes de l'approche du cycle de vie est une chose. Les appliquer concrètement à grande échelle en est une autre. Pour réussir cette mise en œuvre, vous devrez utiliser une infrastructure numérique performante. Deux hubs interconnectés assurent la continuité numérique de vos produits. Chacun d'eux est conçu en conformité avec une nouvelle réglementation, qui peut également offrir des opportunités de financement pour leur déploiement.

La figure 5-7 montre le lien entre les données produits issues des systèmes d'étude et les recettes de conception, également appelées *spécifications de configuration*. Dans les systèmes opérationnels, les données produits sont, quant à elles, associées au numéro de série de l'actif.

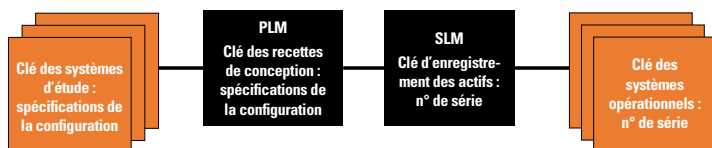


FIGURE 5-7 : La continuité numérique du cycle de vie.

Centre technique

Le premier centre névralgique correspond à la nomenclature modulaire au sein d'un système PLM. La figure 5-8 illustre la manière dont vos données d'empreinte, ou votre inventaire du cycle de vie s'organisent autour de cette structure. Les bases de données des matériaux sont connectées au système PLM via les outils de CAO, au niveau des matériaux. Elles regroupent les empreintes liées aux activités de production, spécifiquement pour la fabrication des pièces. Les bases de données des pièces fournies par les sous-traitants sont, quant à elles, reliées au niveau de l'achat des pièces. Au niveau de la configuration, la nomenclature PLM s'appuie sur des outils d'analyse du cycle de vie (ACV) pour simuler l'impact environnemental dès la conception, puis produire des déclarations de performance environnementale (EPD) une fois la conception finalisée.

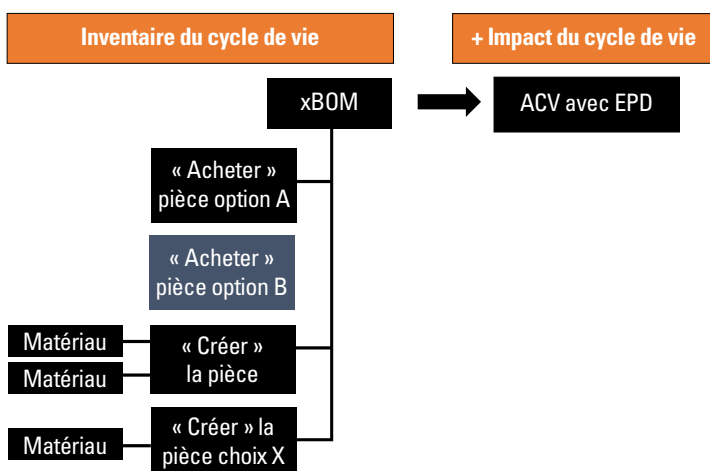


FIGURE 5-8 : La nomenclature modulaire centralise l'inventaire du cycle de vie d'un produit.



CONSEIL

Du point de vue des données techniques, la durabilité se concentre sur trois axes : la modularité, l'intégration de la chaîne logistique et le recours à de nouvelles formes de simulation. L'analyse du cycle de vie (ACV) constitue, sur le plan technique, une simulation environnementale.

Outre les synthèses modulaires de l'encombrement des nomenclatures, la gestion du cycle de vie des applications (ALM) s'intègre de deux manières à la nomenclature. La figure 5-9 décrit ces différentes intégrations. Dans un premier temps, les composants logiciels modulaires sont associés à la nomenclature unifiée pour compléter les pièces physiques. Ensuite, les exigences gérées dans l'ALM sont tracées à la fois dans les tests ALM et dans les objets de conception du système PLM. Cette double traçabilité permet de vérifier que les exigences de durabilité sont bien prises en compte et couvertes par les tests.

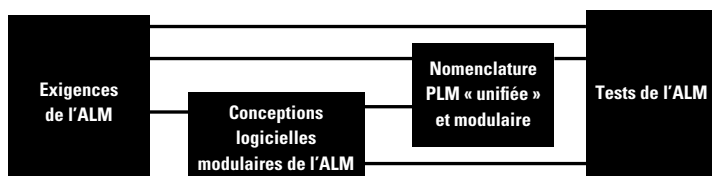


FIGURE 5-9 : Détails des intégrations ALM.

Centre d'actifs

Le deuxième centre est un système d'enregistrement des actifs physiques, représenté dans la figure 5-10. À sa création, l'actif commence par une copie de sa recette de nomenclature provenant du système PLM (qui peut être complétée par les spécificités de l'ordre de fabrication, si elles sont disponibles).

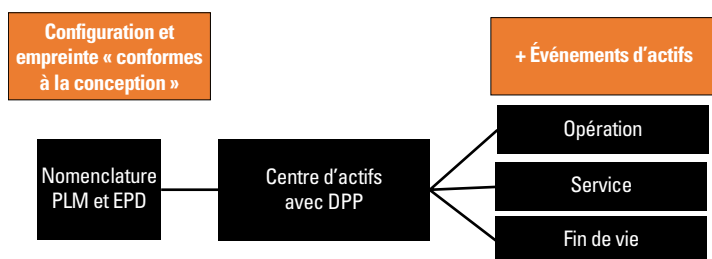


FIGURE 5-10 : Le passeport numérique des produits (DPP) est un sous-ensemble du centre d'actifs.

Ce centre d'actifs maintient ensuite un registre des activités pertinentes, accessible aux propriétaires, prestataires de services, concepteurs, gestionnaires de garanties et autres parties prenantes. Dans le cadre des processus liés au passeport numérique des produits (DPP), ce registre intègre notamment des données sur l'emplacement, la propriété et le retour. Ces informations permettent de démontrer la circularité des matériaux et des pièces utilisés, y compris celle du produit en fin de vie.



La durabilité exige une intégration bien plus rigoureuse des données relatives aux actifs, aussi bien dans la chaîne logistique que dans le service après-vente. Pour faire face à ces exigences, des acteurs du secteur, à la fois visionnaires et coopératifs travaillent à l'élaboration de normes d'échange. L'Industrial Digital Twin Association (IDTA) a ainsi développé un ensemble de services appelé « Asset Administration Shell » (AAS), conçu pour faciliter l'échange de données sur les actifs, autant en interne qu'entre entreprises. Selon Meik Billmann, directeur général de l'IDTA, l'AAS fournit des informations standardisées sur les actifs tout au long de leur cycle de vie. Cette harmonisation en fait une base idéale pour soutenir les modèles économiques circulaires.

Intégration de la nomenclature PLM et du centre d'actifs

Les réglementations liées à la durabilité, en particulier celles qui encadrent les passeports numériques de produits (DPP), exigent la mise en place d'une infrastructure de données couvrant l'ensemble du cycle de vie. Quatre domaines, parfois moins visibles, mais tout aussi stratégiques, peuvent vous aider à renforcer vos marges tout en diminuant votre empreinte environnementale grâce à cette infrastructure.

LA CIRCULARITÉ REQUIERT UNE MATURITÉ NUMÉRIQUE

Bjoern Stengel, responsable mondial de la recherche et des pratiques de durabilité chez IDC : « Le principal obstacle opérationnel à la mise en œuvre de la circularité en entreprise reste l'absence de solutions logicielles capables de gérer cette circularité au sein des opérations et des chaînes logistiques. Relever ce défi nécessite de s'appuyer sur un fournisseur qui comprend à la fois les particularités du secteur et les besoins propres à l'entreprise. Cette collaboration permet d'adopter une approche informatique de la durabilité alignée sur les principes de l'économie circulaire. »

Directives spécifiques à la configuration

Les techniciens de première ligne, qu'ils interviennent sur les chaînes d'assemblage, en zones d'inspection, sur les sites d'exploitation, dans les ateliers de maintenance, à bord des camions de maintenance ou dans les centres de reconditionnement, ont besoin d'instructions précises, à jour et adaptées à chaque configuration. Avec la conception modulaire, qui est l'élément clé d'une circularité rentable, chaque produit qu'ils manipulent peut différer du précédent.

Heureusement, un centre d'actifs conserve les paramètres de configuration des équipements sur lesquels les techniciens interviennent. Le système PLM peut ainsi s'appuyer sur ces données pour filtrer les instructions et les listes de pièces en fonction de chaque configuration. Grâce à cette continuité numérique, la complexité liée à la variabilité des produits disparaît pour les équipes de première ligne.

Prévisions basées sur l'équipement

Si votre entreprise vend des pièces de rechange, deux chiffres méritent votre attention. Le premier concerne leur rentabilité : la marge dégagée

sur les pièces de rechange est fréquemment quatre à cinq fois plus élevée que celle des ventes initiales de produits. Le second chiffre porte sur la taille des stocks. Pour un fabricant dont le chiffre d'affaires atteint un milliard de dollars, cela représente souvent plusieurs dizaines, voire des centaines de millions de dollars de pièces immobilisées dans des entrepôts ou des camions répartis dans le monde entier avec, en conséquence, une empreinte carbone significative.

Les logiciels d'optimisation des pièces de rechange permettent aux fabricants de maintenir les bonnes quantités de pièces aux bons emplacements pour atteindre leurs objectifs de niveau de service. À la base, ces outils s'appuient sur les données historiques afin de prévoir les besoins futurs. Lorsqu'ils intègrent également des informations plus détaillées, telles que la durabilité des pièces, les configurations produits, la localisation des actifs et leur état, ils offrent un potentiel bien plus important. Grâce à cette approche enrichie, il devient possible de réduire les stocks de plusieurs millions de dollars, tout en diminuant les émissions de carbone.

Conception et services basés sur les données

Les responsables techniques et les analystes parlent de la conception pilotée par les données depuis des décennies. Dans un monde idéal, les ingénieurs d'études recevront en continu des données fiables en provenance des actifs déployés sur le terrain. Ils pourront ainsi réagir rapidement aux problèmes de surconception ou de sous-conception. Le service après-vente pourra alors développer des offres sur mesure à grande échelle.

Sur le papier, l'idée est séduisante. En pratique, elle reste souvent confinée aux amphithéâtres universitaires, car les fabricants peinent à collecter des données terrain suffisamment détaillées. Néanmoins, l'adoption des passeports numériques change la donne. Elle ouvre une voie rapide pour que votre centre d'actifs recueille des données tout au long du cycle de vie produit ; des données que votre entreprise pourra exploiter concrètement.

Valeur boostée par l'IA

L'IA est au cœur des discussions actuelles. Quel lien avec la durabilité ? La réponse tient en peu de mots, mais elle est essentielle. La durabilité agit comme un levier pour collecter les données riches et structurées dont l'IA a besoin afin de produire des analyses pertinentes. Les déclarations de performance environnementales (EPD) et les passeports numériques (DPP) imposent une structuration rigoureuse des données, connectées tout au long du cycle de vie. Sur cette base, l'IA peut aller très loin, bien au-delà de la seule réduction de l'empreinte écologique.

- » Définir la circularité comme objectif
- » Tenir compte des DPP
- » Faire le bonheur de votre directeur financier
- » Établir votre continuité numérique

Chapitre 6

Dix conseils pour réduire votre empreinte écologique tout au long du cycle de vie des produits et améliorer votre rentabilité

La durabilité des produits est un sujet complexe, dont l'importance ne cesse de croître à mesure que les entreprises s'y engagent et y consacrent des ressources. Vous consultez peut-être ce chapitre pour obtenir un aperçu des éléments clés, ou au contraire en fin de parcours, à la recherche de recommandations concrètes. Dans les deux cas, vous y trouverez dix conseils pratiques pour réduire votre empreinte écologique tout en préservant ou en améliorant la rentabilité.

Pensez à la totalité du cycle de vie

Dans l'industrie de la fabrication discrète, les opérations réalisées au sein de votre usine ne comptent généralement que pour 1 à 10 % de l'empreinte totale de vos produits. La majeure partie, entre 90 et 99 %, se situe en amont et en aval du cycle de vie, notamment dans la chaîne logistique, l'utilisation et la fin de vie des produits.

- » *En amont*, le choix des matériaux et leur utilisation, tout comme la sélection des pièces fournies par les partenaires, méritent une attention renforcée. Des données plus fiables et des outils d'aide à la

décision plus performants permettent d'optimiser les coûts, de renforcer la résilience de la chaîne logistique et de réduire son empreinte environnementale.

- » *En aval*, la mise en place de programmes circulaires pour les matériaux et l'énergie devient indispensable. Cela passe par des systèmes modulaires, la récupération des pièces, l'électrification ou encore des services reposant sur des solutions logicielles. Fait paradoxal, mais stratégique : la circularité en aval constitue un levier clé pour créer de la valeur en amont. Elle rend possibles une réutilisation, un reconditionnement et un recyclage efficaces des pièces.

Veillez vous reporter au chapitre 5 pour plus d'informations sur cette approche du cycle de vie.

Privilégiez la circularité grâce à du matériel et à des logiciels modulaires

Une circularité rentable repose sur la modularité. C'est la seule approche capable d'assurer à la fois la disponibilité et la demande pour les pièces reconditionnées. Les produits actuels doivent combiner modularité logicielle et matérielle. Prenons l'exemple d'une unité de commande reconditionnée provenant du produit A : sans mise à jour logicielle spécifique, elle ne pourrait pas être intégrée au produit B. Les logiciels jouent aussi un rôle essentiel dans la promotion de comportements durables chez les utilisateurs, dans l'entretien des équipements et dans le suivi efficace des retours.

N'oubliez pas les techniciens de première ligne

Les produits circulaires exigent une conception modulaire, mais cette modularité introduit une forte variabilité qui stimule les ventes, en multipliant les options offertes aux acheteurs. En revanche, si elle n'est pas maîtrisée, elle peut compliquer le travail des équipes de première ligne. Intégrer ces collaborateurs dans votre réflexion sur la conception modulaire est essentiel.

À chaque étape, sur la chaîne de montage, en zone d'inspection ou sur le site du client, le technicien de première ligne se retrouve face à un produit modulaire différent de celui qu'il a manipulé auparavant. Veillez donc à réduire cette complexité en vous appuyant sur des solutions numériques adaptées.



CONSEIL

Pour simplifier ce travail, appuyez-vous sur la logique de configuration intégrée au système de gestion du cycle de vie des produits (PLM). Elle permet de filtrer les instructions en fonction des produits que les employés fabriquent ou entretiennent, afin de leur fournir uniquement les informations pertinentes.

Considérez votre EPD comme une fonction d'une nomenclature bien remplie

Les déclarations de performance environnementale (EPD) peuvent donner l'impression d'être des étiquettes écologiques complexes, voire décourageantes. Comment allez-vous recruter et financer des experts environnementaux capables de calculer manuellement une EPD pour chaque produit que vous commercialisez ?

Grâce à une gestion rigoureuse de la nomenclature (BOM), il devient possible d'automatiser une grande partie, voire l'ensemble des EPD. Du point de vue de la durabilité, la nomenclature peut intégrer l'inventaire du cycle de vie (ICV) du produit à partir d'attributs tels que l'intensité carbone, l'intensité en eau, les indicateurs de conformité aux réglementations sur les substances dangereuses, le pourcentage de contenu recyclé ou encore la recyclabilité. À partir de ces données, un outil d'analyse du cycle de vie (ACV) peut produire l'analyse de l'impact du cycle de vie (AICV) nécessaire à l'EPD. Ce calcul permet de déterminer les effets environnementaux spécifiques du produit, comme les émissions de CO₂.



RAPPEL

Si cette avalanche d'acronymes vous paraît indigeste, retenez simplement ceci : « Une nomenclature bien structurée constitue le socle d'une EPD automatisée ». Pour approfondir le sujet, rendez-vous au chapitre 2.

Considérez les avantages du DPP

Du point de vue pessimiste, le passeport numérique des produits (DPP) étend la responsabilité des fabricants en imposant la traçabilité nécessaire à la récupération des matériaux. Pour un optimiste, il représente une nouvelle source de revenus. Dans vos programmes de services en aval, le DPP renforce la relation après-vente avec vos clients. Il ouvre la voie à des services à forte marge, à de nouveaux modèles économiques, à une meilleure valorisation circulaire lors de la reprise et à une fidélisation accrue pour les ventes futures. En amont, les DPP fournis par vos partenaires représentent une ressource précieuse en offrant des données détaillées sur les pièces et les matériaux utilisés. Ces informations guident vos choix techniques et enrichissent vos nomenclatures.



Dans votre base de données produits, les passeports numériques jouent un rôle clé pour faire progresser vos systèmes d'enregistrement des actifs. Le lien établi entre la gestion du cycle de vie des services (SLM) et le PLM permet d'ancrer la conception dans les données réelles, tout en facilitant la prise de décision en première ligne, selon la configuration spécifique de chaque produit. Le chapitre 5 approfondit ces connexions entre les différentes sources de données.

Agissez dès maintenant pour réduire votre empreinte carbone et satisfaire votre directeur financier

Renforcez rapidement votre crédibilité en vous concentrant sur les domaines où la réduction de l'empreinte carbone s'accompagne de gains financiers. Ces initiatives devraient être engagées indépendamment des objectifs de durabilité. Elles sont à la fois profitables pour l'entreprise et bénéfiques pour l'environnement. Le levier le plus accessible pour un directeur financier reste la réduction des coûts. Supprimer les matériaux et l'énergie superflus dans vos produits et services permet, dans bien des cas, de réaliser des économies substantielles. D'autres leviers de création de valeur liés à la décarbonation incluent la segmentation des clients selon leur sensibilité aux primes écologiques, la conformité réglementaire, l'atténuation des risques dans la chaîne logistique, ainsi que l'accès à diverses subventions régionales.



Les analystes et les experts s'accordent sur un point : il est aujourd'hui possible de réduire de moitié, voire plus, votre empreinte écologique en appliquant des méthodes qui sont aussi rentables sur le plan financier. La décennie 2020 offre déjà de nombreuses opportunités de réussite dans des projets de durabilité à forte valeur économique. Quant aux années 2030, elles verront l'essor de nouvelles approches qui ouvriront la voie à d'autres avancées. Le chapitre 3 explore ce sujet plus en profondeur.

Envisagez de prendre l'initiative sur des sujets cruciaux pour la marque

Dans le domaine du développement durable, prendre les devants peut entraîner des coûts plus élevés que d'attendre l'adoption de solutions à grande échelle. Mais agir en pionnier peut aussi offrir des avantages significatifs, surtout lorsque l'initiative s'aligne étroitement avec l'identité de votre marque.

Adoptez une approche audacieuse lorsque la situation l'exige, tout en vous préparant avec rigueur avant de passer à l'action. De nombreuses

ressources publiques peuvent vous servir de référence. Le documentaire *Beyond Zero*, qui retrace l'engagement d'Interface autour de ses moquettes modulaires, constitue un excellent exemple à suivre (rendez-vous sur beyondzerofilm.com pour de plus amples informations). Consultez également les rapports sur la durabilité publiés par des marques emblématiques comme Patagonia, Schneider Electric, IKEA ou Vestas, pour comprendre comment elles ont harmonisé leurs pratiques avec leurs valeurs.

Les domaines d'innovation sont vastes, mais peuvent inclure :

- » Un approvisionnement en matériaux et en énergie de haute performance, destiné aux segments de clientèle sensibles aux « primes écologiques »
- » Une utilisation de la fabrication additive pour réduire le poids et/ou améliorer la résilience des pièces de rechange
- » Des plateformes circulaires multigénérationnelles avec programmes commerciaux de location/mise à niveau

Développez une intuition de la valeur carbone

Pour réussir votre décarbonation, commencez par repérer les opportunités les plus prometteuses. Fondamentalement, les êtres humains doivent maintenir le carbone de la géosphère dans les profondeurs de la géosphère (et lorsque nous en prélevons, nous devons en restituer la même quantité). Dans le secteur de la fabrication discrète, cela signifie réduire l'énergie fossile tout au long de la chaîne de valeur du cycle de vie.

Que faire si vous avez encore besoin de brûler des combustibles fossiles à long terme (au-delà de 2050) ? Vous pouvez les brûler, mais modélisez vos coûts futurs afin de réinjecter une quantité comparable de carbone dans la géosphère par captage direct de l'air (DAC) ou par d'autres moyens (voir le chapitre 2 pour plus de détails sur les cycles du carbone).

Dans le tableau 6-1, un graphique simple vous permet de comprendre la valeur actuelle et future de la réduction des combustibles fossiles (n'oubliez pas que la valeur de votre entreprise est évaluée en fonction de son potentiel de bénéfices futurs). La conduite d'une voiture à carburant fossile est comparée avec celle d'un véhicule électrique chargé avec de l'électricité produite à partir de combustibles fossiles et d'un véhicule électrique chargé à l'énergie solaire.

TABLEAU 6-1 Comparaison entre 4 000 km parcourus aux États-Unis dans différents véhicules

Option de voiture	Coût énergétique	Kg CO2e	Coût du DAC
Véhicule à essence	300 \$	1 000	100 \$
Véhicule électrique rechargé sur le réseau	140 \$	500	50 \$
Véhicule électrique rechargé à l'énergie solaire domestique	Proche de 0 \$	Proche de 0	Proche de 0 \$

Ce tableau met en évidence les coûts énergétiques actuels pour le conducteur, les émissions associées au véhicule, ainsi que les obligations futures liées à la recapture du CO2. Il prend comme hypothèse un coût de 100 dollars par tonne métrique d'équivalent de dioxyde de carbone (MTCO2e) en 2050 pour une captation directe dans l'air visant à réinjecter ce carbone dans la géosphère. Ces données peuvent nourrir une réflexion plus large sur l'ensemble du cycle de vie : extraction minière, traitement des matériaux, transport, fabrication, exploitation des produits, services, production d'électricité, ou toute autre activité impliquant encore la combustion d'énergies fossiles.

Développez une intuition de la circularité



ATTENTION

Évitez autant que possible de répéter des activités énergivores pour livrer les produits en appliquant les principes de circularité :

- » **Bon** : le recyclage évite l'extraction minière.
- » **Mieux** : le reconditionnement évite le traitement des matériaux et l'exploitation minière.
- » **Meilleur** : la réutilisation ou la réparation des produits permet d'éviter l'ensemble de ces impacts.

Cependant, n'oubliez pas que la réduction de l'empreinte écologique ne représente que la moitié des besoins. L'autre moitié consiste à rendre la circularité rentable :

- » **Bon** : le choix des matériaux et la conception en vue du démontage facilitent le recyclage.
- » **Mieux** : la modularité répond à la fois à l'offre et à la demande en matière de pièces reconditionnées.

- » **Meilleur** : les systèmes de services associés aux produits améliorent l'efficacité en matière d'utilisation, de maintenance et de récupération. Ces gains se traduisent directement par une meilleure rentabilité.

La circularité constitue l'objectif économique à atteindre. Elle maximise non seulement la rentabilité, mais permet aussi de répondre aux trois grands critères de durabilité des produits :

- » Préservation des matériaux épuisables (peu ou pas de déchets)
- » Décarbonation (les produits reconditionnés peuvent être de 60 à 95 % plus efficaces en termes d'émission carbone que les produits linéaires)
- » Contrôle des matières dangereuses (évite l'incinération, la pollution de l'eau et le lessivage des décharges)

Utilisez l'objectif de durabilité pour établir votre continuité numérique

Dans un scénario idéal, une nomenclature PLM modulaire constitue le système de configuration de référence, reliée à un centre d'actifs qui fait office de référentiel pour vos équipements physiques. Les différents systèmes impliqués viennent se connecter à ces deux hubs centraux. Le chapitre 5 offre une exploration plus approfondie de la continuité numérique tout au long du cycle de vie.

Avec l'évolution des réglementations qui encouragent l'adoption des EPD et des passeports numériques, la mise en place rapide de ces fondations devient indispensable. Les nomenclatures issues du système PLM permettent d'automatiser la génération des EPD. Quant aux centres d'actifs, ils remplissent le rôle de passeports pour les produits. Une base de données aussi robuste ne se limite pas à la durabilité. Elle ouvre la voie à de nombreux autres avantages, notamment dans le domaine de l'intelligence artificielle. Mais ce sujet mériterait à lui seul un ouvrage complet. En attendant, j'espère que celui-ci vous apportera des perspectives utiles et sources d'inspiration.



FAITES CONFIANCE À **PTC**

ptc.com



Nos clients fabriquent les produits dont le monde entier dépend, et ils font confiance à PTC pour en assurer le cycle de vie, de la conception à la fabrication, de l'entretien à la mise au rebut. Nous pouvons vous aider à transformer votre entreprise, grâce à notre vaste expérience dans le domaine de la gestion et des processus industriels, ainsi qu'à nos technologies leaders sur le marché.

Augmentez vos bénéfices grâce à des produits plus performants et plus écologiques

Découvrez comment diminuer l'impact environnemental de vos produits et booster votre rentabilité par la même occasion. Découvrez les meilleures pratiques pour créer des produits durables, avec des recommandations concrètes et l'expertise de spécialistes, spécialement conçues pour les sous-traitants industriels. Professionnel aguerri ou nouvel acteur du secteur, vous trouverez dans ce guide une approche claire et innovante pour créer un impact positif. Faites le point sur les principaux leviers de la durabilité, identifiez les domaines stratégiques et les actions prioritaires à mettre en œuvre à chaque étape du cycle de vie des produits. Prenez une longueur d'avance et engagez vos produits sur la voie d'un avenir plus durable.

À l'intérieur...

- Définir la durabilité des produits
- Comprendre les exigences de conformité
- Réduire de manière rentable l'empreinte écologique de vos produits
- Découvrir l'éco-conception
- Adopter une approche axée sur la totalité du cycle de vie
- Passer à une économie circulaire
- Différencier les offres de produits



Dave Duncan occupe le poste de responsable de la durabilité chez PTC. Il pilote le développement des fonctionnalités durables au sein du portefeuille de solutions PTC, avec pour objectif d'accompagner les clients dans la conception, la fabrication et la maintenance de produits plus respectueux de l'environnement. Il supervise également l'ensemble des initiatives environnementales et sociales de l'entreprise.

Allez sur [Dummies.com](https://dummies.com)[®]
pour voir des vidéos, des exemples
pas à pas, des articles pratiques,
ou pour faire des achats !

ISBN: 978-1-394-36822-8

Revente interdite

pour
les nuls[®]
A Wiley Brand



WILEY END USER LICENSE AGREEMENT

Go to www.wiley.com/go/eula to access Wiley's ebook EULA.