

MANUEL-CADRE SUR
**LA CHIMIE
VERTE ET
DURABLE**



Reproduction

La présente publication peut être reproduite en tout ou partie, et sous quelque forme que ce soit, à des fins éducatives et non lucratives sans autorisation spéciale du détenteur des droits d'auteur, à condition de la citer comme source. Le Programme des Nations Unies pour l'environnement apprécierait de recevoir une copie de toute publication utilisant le présent manuel comme source.

Aucune utilisation de la présente publication à des fins de revente ou à toute autre fin commerciale, ne peut être faite sans l'accord préalable par écrit du Programme des Nations Unies pour l'environnement.

Avertissement

Les appellations retenues dans la présente publication et la présentation des éléments qui y figurent n'impliquent de la part du Programme des Nations Unies pour l'environnement aucune prise de position quant au statut juridique des pays, territoires, villes ou zones mentionnés ou de leurs autorités, ni quant au tracé de leurs frontières ou limites. Par ailleurs, les opinions exprimées ne reflètent pas nécessairement les décisions ou les politiques du Programme des Nations Unies pour l'environnement, de même que la mention de marques ou procédés commerciaux n'implique aucune approbation de fait.

Remerciements

Le Programme des Nations Unies pour l'environnement tient à remercier toutes les personnes et les organisations ayant apporté leur généreuse contribution par leur expertise, leur temps et leur énergie.

Le manuel-cadre a été élaboré par le Service Substances chimiques et santé, qui relève de la Division de l'économie du Programme des Nations Unies pour l'environnement, avec l'appui des personnes suivantes :

Auteur principal : Achim Halpaap

Coordonnatrice du projet : Sandra Averous-Monnelly

Au sein du PNUE, de précieuses contributions ont également été apportées par Monika Gail MacDevette, Jacqueline Alvarez, Josiane Abonyo, Amelie Ritscher et Tapiwa Nxele.

Un groupe d'experts a fourni des avis consultatifs, offrant des orientations, des contributions et des observations écrites sur le plan annoté et les différentes moutures du manuel-cadre. Merci à : Sam Adu-Kumi, Paul Anastas, Ahmad Ansari, Marie-Ange Baucher, Lorena Betancor, Richard Blume, Ryan Bouldin, Irene Caldwell, William Carroll, Claudio Cinquemani, Divya Datt, Jost Dittkrist, Agnes Dittmar, Jutta Emig, Creta Gambillara, Claire Gouvary, Peter Gregory, Jean Grundy, Juergen Helbig, Bettina Heller, Klaus Kümmerer, Suzanne Leppinen, Anna S. Makarova, Brandon Morris, Carlos Ocampo, Steffi Richter, Hans-Christian Stolzenberg, Nydia Suppen, Blandine Trouille, Pietro Tundo, Dirk Uhlemann, Luis Umanzor, Claudia A. Pena Urrutia et Vania Zuin.

Des observations complémentaires ont été formulées par : Laetitia Montero Catusse, Peter Fantke, Kei Ohno-Woodall Ajiniyaz Reimov, Joel Tickner, Elisa Tonda et Ran Xie

Le projet de rapport a été communiqué aux autres membres du Programme interorganisations pour la gestion rationnelle des produits chimiques (IOMC) afin de recueillir leurs observations.

Le rapport a pu être établi grâce au soutien financier du gouvernement allemand.

Droits d'auteur © Programme des Nations Unies pour l'environnement, 202X.

ISBN no : XXX-XX-XXX-XXXX-X

Numéro de série : DTI/XXXX/GE

Mise en page et conception graphique : Lowil Espada.

Retour d'informations et contact : Le Programme des Nations Unies pour l'environnement invite les lecteurs intéressés par le présent rapport à prendre contact et à faire part de leurs points de vue sur celui-ci.

E-mail: science.chemicals@un.org

Site Internet: <https://www.unenvironment.org/explore-topics/chemicals-waste>

**À propos du
manuel-cadre
sur la chimie verte
et durable**

Le présent manuel-cadre sur la chimie verte et durable a été élaboré en vertu du mandat confié par l'Assemblée des Nations Unies pour l'environnement en 2019 dans sa résolution 4/8. Il vise essentiellement à faciliter une meilleure compréhension et à fournir des orientations aux pays et aux parties prenantes pour promouvoir la chimie verte et durable. Le manuel sera complété par un résumé à l'intention des décideurs, ainsi que par des manuels spécifiques (dans la mesure des ressources disponibles) qui couvriront des sujets précis qu'il reste à déterminer.

Un groupe d'experts a fourni des orientations sur le plan annoté du manuel lors d'un atelier organisé les 5 et 6 décembre 2019 à Genève (Suisse). Une version révisée a été établie en tenant compte des commentaires et recommandations formulés. Une première version du projet de manuel-cadre a été examinée lors d'une réunion virtuelle d'experts tenue le 22 juin 2020. Les contributions reçues lors de cette réunion, ainsi que les observations écrites des experts, ont été prises en considération dans la préparation du présent projet révisé. Finalement, un processus de consultation visant à recueillir les dernières suggestions concernant le projet de manuel a eu lieu au quatrième trimestre de 2020.

Table of Contents

1 INTRODUCTION

page **1**

**2 CHIMIE ET
DÉVELOPPEMENT
DURABLE : DÉFIS ET
PERSPECTIVES**

page **9**

**3 QUELS SONT
LES RÉSULTATS
ATTENDUS DE
L'ACTION EN FAVEUR
D'UNE CHIMIE VERTE ET
DURABLE ? OBJECTIFS
ET PRINCIPES
DIRECTEURS**

page **29**

**4 INNOVATION
CHIMIQUE ET
TECHNOLOGIQUE
EN FAVEUR DE LA CHIMIE
VERTE ET DURABLE**

page **39**



**5 POLITIQUES,
OUTILS ET
INSTRUMENTS**
VISANT À PROMOUVOIR
LA CHIMIE VERTE ET
DURABLE

page **61**

**6 SECTEURS ET
PROGRAMMES
PORTEURS** POUR
LA PROGRESSION VERS
LA CHIMIE VERTE ET
DURABLE

page **73**

**7 CRITÈRES
MESURABLES ET
MÉCANISMES
DE COMMUNICATION
D'INFORMATIONS
PERMETTANT DE
PROMOUVOIR LA CHIMIE
VERTE ET DURABLE**

page **85**

**8
ÉLABORATION
PAR LES PARTIES
PRENANTES DE
FEUILLES DE ROUTE
POUR LA CHIMIE VERTE
ET DURABLE**

page **91**





INTRODUCTION >

Contexte	2
Mandat du présent manuel	3
Objet et approche	3
Aperçu du manuel-cadre	4
Participation des parties prenantes à l'élaboration du manuel	7

Contexte

Les concepts de chimie verte et de chimie durable suscitent une attention croissante dans le monde entier, du fait de leur potentiel pour ce qui est d'innover et de faire progresser la chimie en appui à la réalisation des objectifs mondiaux de développement durable et de leurs cibles. Si le concept de « chimie verte » a été introduit dans le cadre des 12 principes bien établis publiés en 1998 (Anastas et Warner, 1998), celui de « chimie durable » est apparu plus récemment en tant que concept étroitement apparenté, mais plus holistique (Blum *et al.*, 2017 ; Kümmerer, 2017).

Le présent manuel établit un état des lieux des évolutions survenues dans le domaine de la chimie verte et durable, y compris leurs dimensions scientifique et sociale. Sur la base de cette analyse, il fournit des orientations jugées pertinentes pour permettre à diverses parties prenantes de transposer à plus grande échelle les mesures novatrices en matière de chimie verte et durable et d'évaluer les pratiques de gestion. Le Manuel s'appuie sur le rapport de 2019 du Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE) analysant les communications des parties prenantes sur la chimie durable en application de la résolution 2/7 de l'Assemblée des Nations Unies pour l'environnement (ci-après l'« Assemblée pour l'environnement ») (« Analysis of Stakeholder Submissions on Sustainable Chemistry Pursuant to UNEA Resolution 2/ 7», PNUE, 2019a), rapport examiné à la quatrième session de l'Assemblée pour l'environnement en 2019.

Le rapport du PNUE cité ci-dessus (2019a) faisait la synthèse de plus de 50 communications dans lesquelles les parties prenantes avaient présenté les meilleures pratiques en matière de chimie durable. Il y était souligné que, malgré les progrès appréciables réalisés, il s'avérait difficile d'identifier les meilleures pratiques étant donné l'absence de critères communs d'évaluation. Le rapport faisait également remarquer que les parties prenantes faisaient une interprétation large du concept de chimie durable. Sur la base de l'analyse effectuée, le rapport accueillait favorablement un renforcement des coopérations à l'avenir, afin de faciliter une compréhension commune du concept de chimie durable, notamment de la relation entre chimie verte et chimie durable.

Le deuxième rapport sur les perspectives mondiales en matière de produits chimiques (Global Chemicals Outlook II, ci-après le « rapport GCO-II »), publié par le PNUE en 2019 (PNUE, 2019b) apporte des indications complémentaires sur les opportunités de promouvoir la chimie verte et durable tout au long des chaînes de valeur et d'approvisionnement. Il préconise une action porteuse de changement et met en avant les possibilités de prendre des mesures pour renforcer un cadre qui facilite l'avancement de la chimie verte et durable.

Mandat du présent manuel

La résolution 4/8 sur la gestion rationnelle des produits chimiques et des déchets, adoptée par l'Assemblée pour l'environnement à sa quatrième session en 2019, s'est félicitée de l'analyse des meilleures pratiques en matière de chimie durable effectuée par le PNUE et a reconnu qu'il était utile de mieux cerner les possibilités qui s'offrent en matière de chimie durable à l'échelle mondiale. Dans cette résolution, l'Assemblée pour l'environnement a « pri[é] la Directrice exécutive, sous réserve de la disponibilité de ressources et, le cas échéant, en coopération avec les organisations membres du Programme interorganisations pour la gestion rationnelle des produits chimiques

[...] de dresser une synthèse de l'analyse d'une meilleure pratique en matière de chimie durable réalisée par le Programme des Nations Unies pour l'environnement dans des manuels sur la chimie verte et la chimie durable, en consultation avec les parties prenantes concernées, avant sa cinquième session, et de poursuivre les travaux sur une approche globale de la gestion rationnelle des produits chimiques et des déchets à long terme, compte tenu à la fois de l'importance d'une gestion rationnelle des produits chimiques et des avantages possibles des produits chimiques pour le développement durable ».

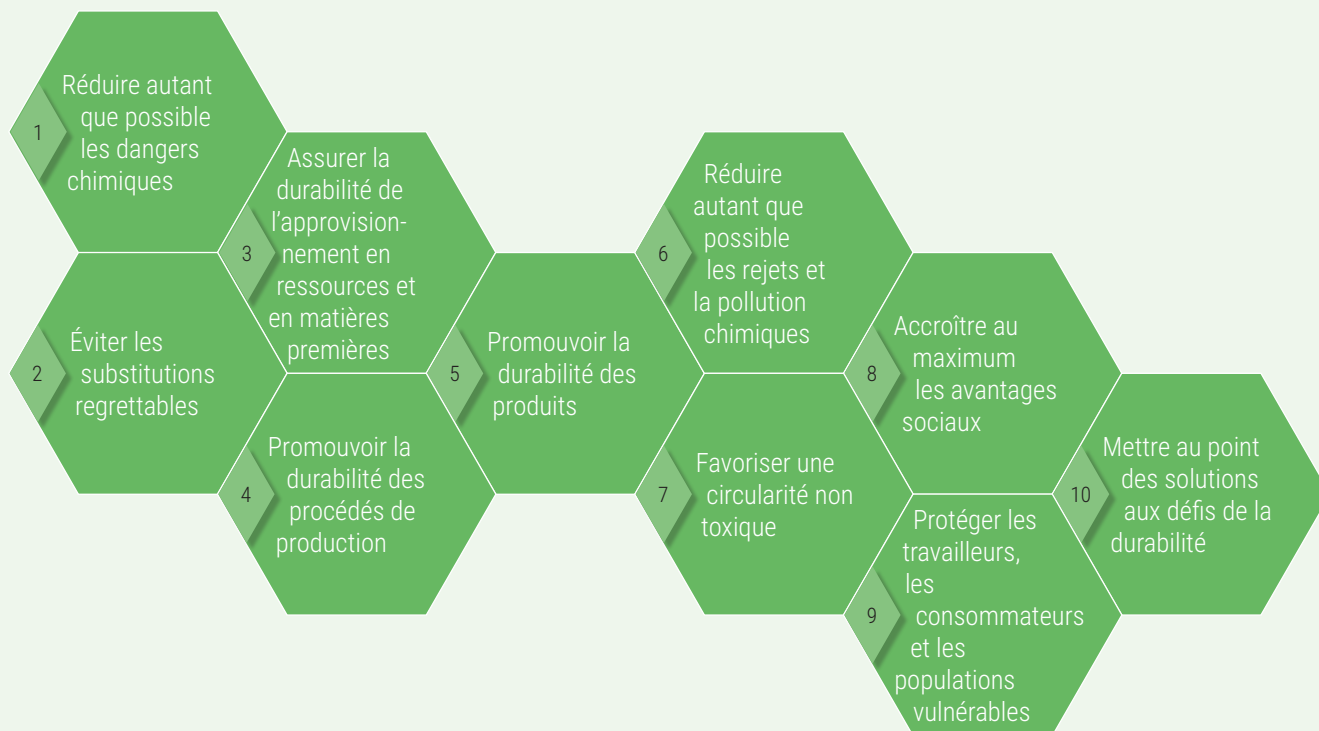
Objet et approche

Le manuel-cadre fournit une vue d'ensemble sur un certain nombre d'aspects scientifiques, techniques et politiques de la chimie verte et durable et est destiné à un large public. Il examine le sujet sous différents angles, dans le but de favoriser l'apprentissage et la réflexion de manière générale, et l'intensification de l'action, sur la base d'une compréhension commune du concept au niveau mondial. Les thèmes ont été identifiés à la suite d'un examen des publications existantes sur la chimie verte et durable, du rapport du PNUE de 2019 sur les meilleures pratiques en matière de chimie durable, et de la deuxième édition du rapport GCO-II. Si les ressources le permettent, le manuel-cadre sera complété par des manuels thématiques consacrés spécifiquement à des questions intéressantes pour les parties prenantes. Un premier manuel portant sur l'éducation en matière de chimie verte et durable sera publié en 2021.

Le manuel présente également un cadre qui structure et décrit les liens de causalité entre les différents thèmes, traitant aussi bien de sujets scientifiques que d'instruments susceptibles de faciliter les progrès de la chimie verte et durable. Les 10 objectifs et principes directeurs pour la chimie verte et durable, qui sont présentés au chapitre 3, sont un élément majeur du cadre. Les objectifs complètent les approches traditionnelles dans le domaine de la chimie, en privilégiant les considérations de durabilité et en mettant en lumière les résultats que la chimie verte et durable cherche à atteindre. Ils fournissent également des indications pratiques pour stimuler l'action des parties prenantes à différents niveaux et dans différents contextes. En fin de compte, les objectifs visent à promouvoir l'innovation dévoile le potentiel complet de la puissance de la chimie ce qui est compatible et soutient le programme de développement durable à l'horizon 2030.

Objectifs et principes directeurs de la chimie verte et durable

Le chapitre 3 du présent manuel présente 10 objectifs et principes directeurs de la chimie verte et durable visant à inciter les parties prenantes à examiner, évaluer et orienter leur action en faveur de l'innovation et leurs pratiques de gestion. Les parties prenantes et les acteurs sont invités à les partager au sein de leurs réseaux et à encourager leur application à vaste échelle.

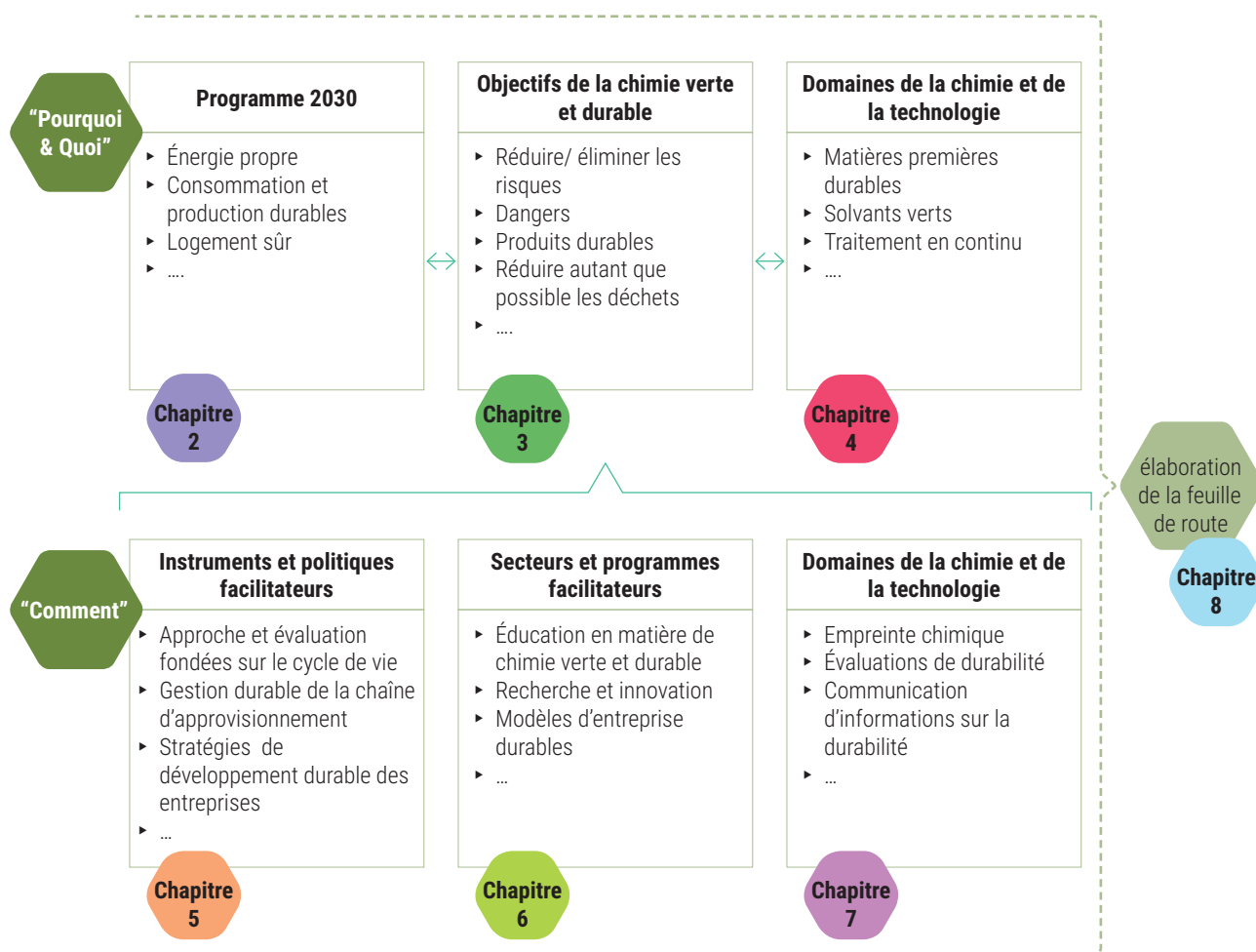


Aperçu du manuel-cadre

Le manuel-cadre est organisé en huit chapitres. Après la présente introduction, le chapitre 2 aborde les défis et perspectives de la chimie en ce qui concerne la réalisation du Programme de développement durable à l'horizon 2030 entériné par l'Assemblée générale des Nations Unies, qui vise à promouvoir la satisfaction des besoins humains tout en restant dans les limites des capacités de la planète. S'appuyant, entre autres, sur les tendances présentées dans le rapport GCO II, ce chapitre présente les arguments en faveur de la promotion de la chimie verte et durable et analyse les progrès réalisés dans ce domaine.

Le chapitre 3 présente 10 objectifs et principes directeurs destinés à guider l'action des parties prenantes afin de pleinement tirer parti du potentiel de la chimie verte et durable dans la progression vers un développement durable au XXI^e siècle. Ces objectifs et principes directeurs entendent ainsi orienter les innovations vertes et durables dans le domaine de la chimie, mais peuvent également s'avérer pertinents pour l'évaluation des pratiques existantes tout au long des chaînes de valeur des substances chimiques et des produits.

Figure 1.1: Promouvoir la durabilité au moyen de la chimie verte et durable



Le chapitre 4 traite des dimensions scientifiques de la chimie verte et durable, en introduisant des thèmes pertinents relatifs à la chimie et à la recherche et l'innovation en matière de technologie. Le chapitre 5 présente ensuite des outils, instruments et politiques de gestion susceptibles de faciliter la promotion de la chimie verte et durable. En lien étroit avec ce dernier, le chapitre 6 examine les secteurs et programmes pertinents. Le chapitre 7 se penche sur les critères mesurables et les mécanismes de communication d'informations permettant de suivre les progrès accomplis et de faire avancer la chimie verte et durable. Le chapitre 8 conclut en appelant les acteurs et décideurs à élaborer des feuilles de route qui contribueront à l'avancement de l'action en faveur de la chimie verte et durable dans différents contextes (en multipliant par exemple les bonnes pratiques).

La structure du manuel suit celle des éléments du cadre conceptuel « Promouvoir la durabilité au moyen de la chimie verte et durable », qui a été élaboré dans le cadre d'un processus consultatif et est présenté ci-dessous (figure 1.1). Les chapitres 2, 3 et 4 traitent des questions du « pourquoi » et du « quoi » de la chimie verte et durable, à savoir pourquoi elle est indispensable et qu'est-ce qu'elle vise à réaliser dans quels domaines spécifiques d'innovation. Les chapitres 5, 6 et 7 portent sur le « comment », à savoir les mesures susceptibles de faire progresser les innovations en matière de chimie verte et durable. Ces éléments, voués à faciliter l'action, vont de la promotion d'approches tenant compte du cycle de vie au renforcement des politiques et programmes de recherche et d'innovation. Un thème important, qui permet une telle facilitation et touche tous les secteurs, est la sensibilisation et l'éducation à tous les niveaux, qui permettent d'amener jusqu'aux acteurs potentiels

le programme de la chimie verte et durable et les connaissances dans ce domaine, par le biais de l'éducation scolaire et parallèle.

Qui sont les parties prenantes incitées à utiliser le présent manuel ?

Le présent manuel-cadre s'adresse à différents publics et parties prenantes s'intéressant à la gestion rationnelle des produits chimiques et des déchets, ainsi qu'aux innovations en faveur de la chimie verte et durable et du développement de produits durables. Parmi les décideurs et les gestionnaires concernés, on peut citer :

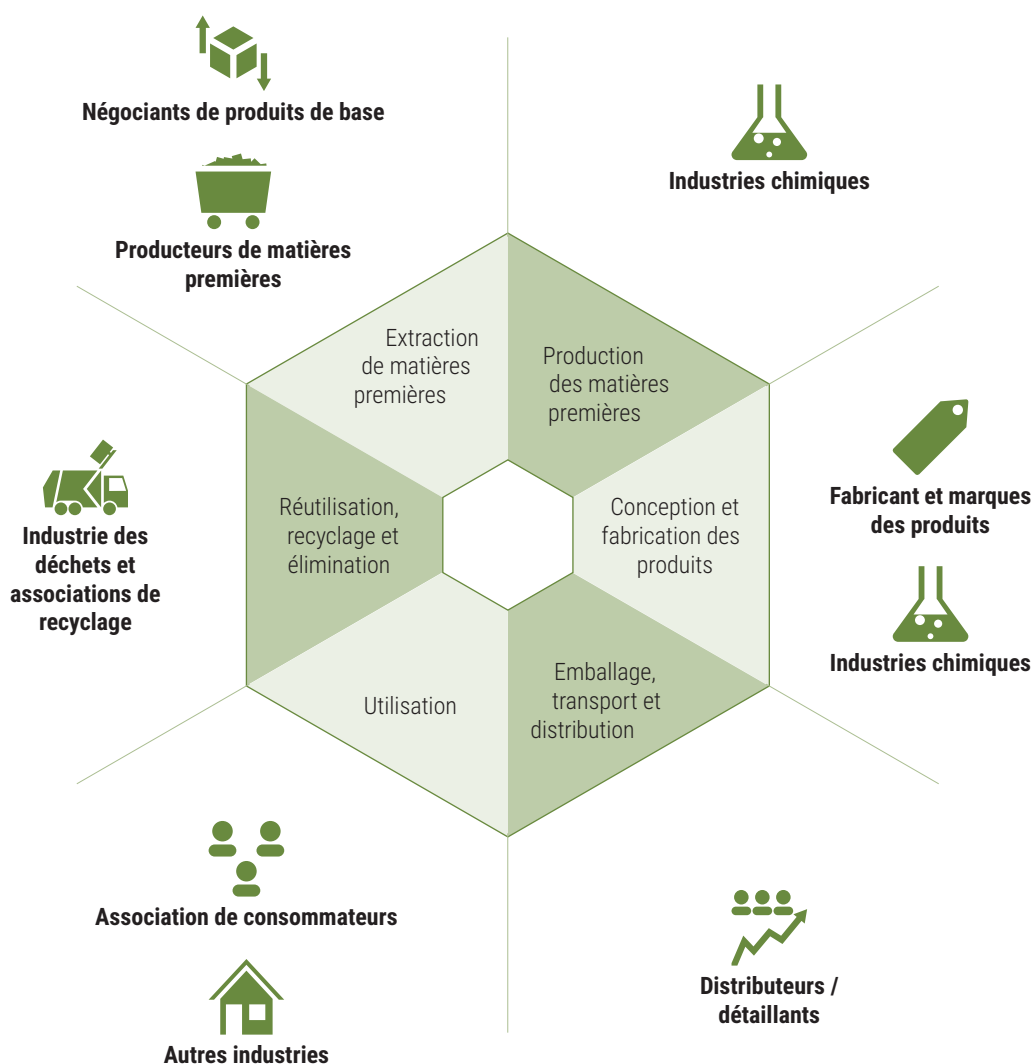
- ▼ **Les pouvoirs publics** chargés de réglementer les substances chimiques préoccupantes et de promouvoir l'innovation pour une chimie plus sûre et la durabilité des produits ;
- ▼ **Les établissements d'enseignement primaires, secondaires et tertiaires** engagés dans la formation de la prochaine génération de scientifiques du XIXe siècle ;
- ▼ **Les institutions universitaires et de recherche** menant des recherches (recherche fondamentale et appliquée) dans des domaines tels que la chimie, l'ingénierie des procédés et la conception de produits ;
- ▼ **Les organismes du secteur privé** impliqués à toutes les étapes de la chaîne de valeur, depuis l'approvisionnement en matières premières jusqu'à la conception, la production, le recyclage et l'élimination des produits ;

- ▼ **Les consommateurs qui** ont le pouvoir de faire évoluer la demande du marché en faveur de produits plus sûrs et plus durables selon les choix qu'ils opèrent ;
- ▼ **Les organisations de la société civile** engagées dans la promotion d'une gestion rationnelle des produits chimiques et des déchets par les acteurs des secteurs public et privé et par les consommateurs ;
- ▼ **Les organisations syndicales** cherchant à protéger les travailleurs contre les substances chimiques dangereuses ;
- ▼ **Les citoyens et le grand public** aspirant à des modes de vie et des sociétés plus durables.

Encourager l'action du secteur privé sur toute la chaîne de valeur

Les **entités du secteur** privé représentent un groupe important de parties prenantes que le manuel cherche à atteindre et à motiver. Les divers acteurs présentés dans la figure 1.2 ont des rôles différents à jouer dans la promotion de la chimie verte et durable à différents stades de la chaîne de valeur des substances chimiques et des produits. La liste de la figure 3.1, bien qu'elle ne soit pas exhaustive, présente les principaux acteurs concernés. Une mesure pratique que les acteurs du secteur privé sont incités à entreprendre est de diffuser largement et d'utiliser les 10 objectifs et principes directeurs présentés au chapitre 3 pour évaluer et guider leurs programmes d'innovation et évaluer leurs pratiques actuelles de gestion.

Figure 1.2: Intervenants du secteur privé dans la chaîne de valeur et le cycle de vie des produits



Participation des parties prenantes à l'élaboration du manuel

Une première version du plan du manuel-cadre a été examinée lors d'une séance d'information technique à la troisième réunion intersessions sur la gestion des produits chimiques et des déchets au-delà de 2020, tenue en septembre 2019 à Bangkok. Des discussions approfondies ont eu lieu lors d'un atelier international organisé les 5 et 6 décembre 2019 à Genève (Suisse). Une version révisée du plan annoté, tenant compte des commentaires et des perspectives

apportés par les participants de l'atelier, a été communiquée début 2020. Une première version du projet de manuel-cadre a été examinée lors d'une réunion virtuelle d'experts, le 22 juin 2020. Les contributions reçues lors de cette réunion, ainsi que les observations écrites des experts, ont été prises en considération dans l'élaboration d'un projet révisé. Enfin, un processus consultatif s'est tenu au quatrième trimestre de 2020.

2



CHIMIE ET DÉVELOPPEMENT DURABLE : **DÉFIS ET PERSPECTIVES** >

- 2.1 Pourquoi une action systémique
est-elle nécessaire pour promouvoir la
chimie verte et durable ? 10
- 2.2 L'évolution de la compréhension des
concepts de chimie verte et de chimie
durable 19

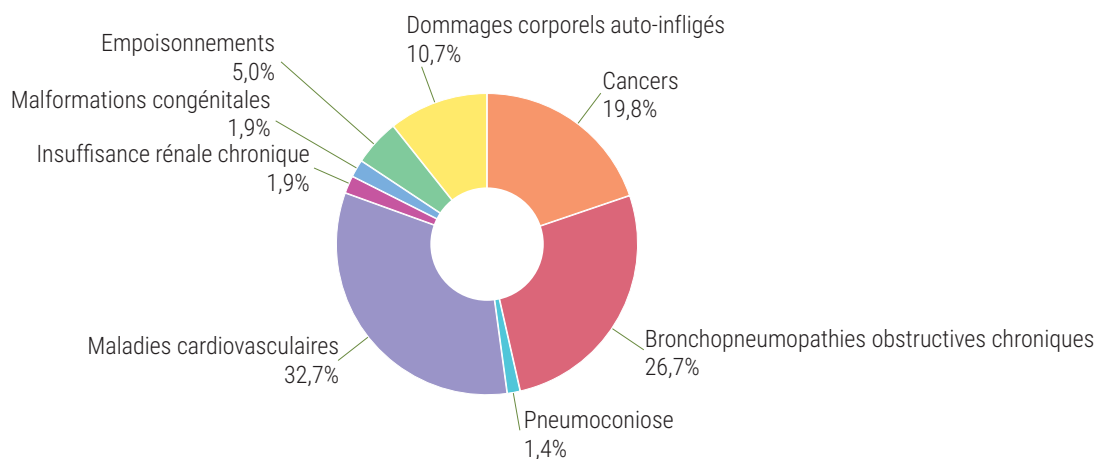
2.1 Pourquoi une action systémique est-elle nécessaire pour promouvoir la chimie verte et durable ?

Les sections ci-après reprennent, approfondissent et mettent en avant certaines des tendances, évolutions et figures présentées dans le rapport GCO-II récemment publié (PNUE, 2019b), tout en présentant les raisons qui justifient de promouvoir l'action en faveur d'une chimie verte et durable.

Les tendances mondiales sont très préoccupantes

Si le rapport GCO-II reconnaît que de nombreux produits chimiques sont importants pour le développement durable, il présente un certain nombre de tendances qui suscitent des inquiétudes du point de vue de la santé humaine, de l'environnement et de la durabilité. Le rapport montre, preuves à l'appui, que le nombre de substances chimiques ne cesse de croître, et que des produits chimiques et d'autres polluants dangereux continuent d'être rejetés dans les environnements intérieurs et extérieurs en grandes quantités, y compris sous forme de déchets, ceci ayant des répercussions néfastes sur les personnes et les communautés dans le monde entier. Les substances chimiques de synthèse sont désormais omniprésentes dans la population humaine et dans l'environnement, et la pollution chimique est devenue l'une des causes principales de maladies et de décès prématurés chez les êtres humains. L'Organisation mondiale de la Santé (OMS) a estimé la charge de morbidité due à certains produits chimiques à une perte de 1,6 million

Figure 2.1: **Décès (total : 1,6 million) attribués à certains produits chimiques (en pourcentage) en 2016** (d'après OMS, 2018a, p. 2)



de vies humaines et à 44,8 millions d'années de vie corrigées du facteur incapacité (AVCI) en 2016 (OMS, 2018a), ces valeurs étant probablement sous-estimées. Les travailleurs, les femmes et les enfants sont particulièrement exposés (PNUE, 2019b). En outre, certains produits chimiques s'accumulent en quantités considérables dans les stocks de matériaux et les produits, ce qui crée des dangers potentiels pour l'avenir.

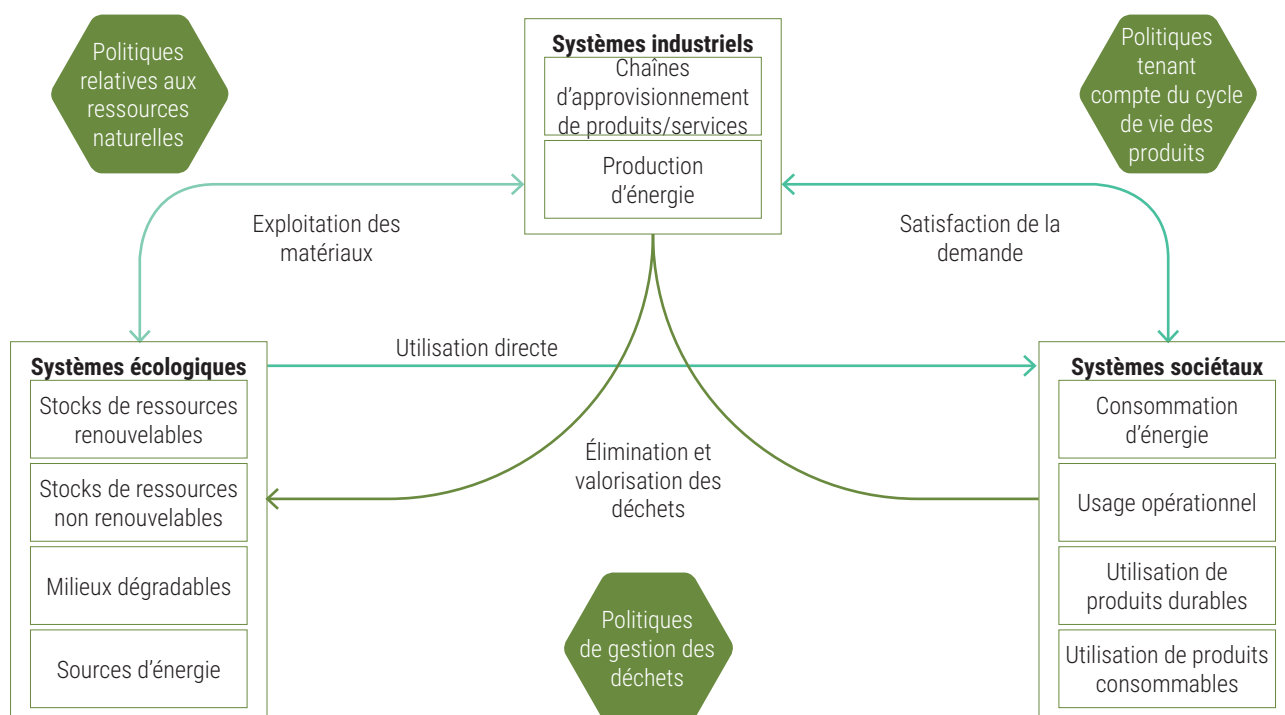
Le rapport GCO-II conclut que l'objectif mondial de réduire autant que possible les effets néfastes des produits chimiques et des déchets ne sera pas atteint d'ici 2020. Il est nécessaire que toutes les parties prenantes prennent de toute urgence des mesures plus ambitieuses à l'échelle mondiale, et « le statu quo n'est pas envisageable ». Une intensification de l'action doit nécessairement inclure la prise immédiate de mesures pour réduire autant que possible les effets néfastes des produits chimiques déjà existants, par exemple en mettant en place des interdictions et des restrictions. Outre ces mesures, la véritable opportunité qui se présente au XXI^e siècle réside dans l'accélération des innovations plus vertes et plus durables dans le domaine de la chimie. Cela peut être réalisé en

multipliant les programmes porteurs d'innovation et en mettant au point et en commercialisant des chaînes d'approvisionnement et de valeur plus durables pour les substances chimiques et les produits, qui couvrent la totalité du cycle du vie.

Flux mondiaux de matériaux et de produits et leur dimension chimique

Depuis l'année 2000, les capacités de production de l'industrie chimique mondiale ont presque doublé, passant de 1,2 à 2,3 milliards de tonnes. Les ventes mondiales de produits chimiques ont totalisé 5 680 milliards de dollars des États-Unis en 2017, et il est prévu qu'elles soient presque multipliées par deux d'ici 2030. On notera que la croissance a été la plus rapide dans les économies émergentes et en développement, sous l'impulsion de l'industrialisation, de l'urbanisation, et de l'essor des secteurs industriels à forte consommation de produits chimiques, tels que la construction, l'industrie agro-alimentaire et l'électronique (PNUE, 2019b). La croissance projetée a beau être créatrice d'opportunités, elle génère également des risques, compte tenu des dangers et aléas

Figure 2.2: **Vue systémique des cycles de flux de matériaux** (Organisation de coopération et de développement économiques [OCDE] 2010, p. 21)



que posent de nombreux produits chimiques sur le marché et du manque de cadres adéquats de gestion des produits chimiques dans de nombreux pays. D'après le rapport GCO-II, ces évolutions, qui résultent d'une augmentation des niveaux de consommation, ne sont pas viables et causent des vulnérabilités au niveau local ainsi que le long des chaînes d'approvisionnement. Les procédés de fabrication avancés s'appuyant sur les innovations en matière de chimie verte et durable offrent des solutions nouvelles pour le XXI^e siècle, s'agissant de parvenir à des modes de consommation et de production durables, à des produits innovants, et à une relation plus équilibrée avec la planète.

L'industrie chimique joue un rôle déterminant dans la transformation des matières premières en produits et en services, avec des flux de matériaux passant entre *les systèmes écologiques*, industriels et sociétaux. La chimie est également la principale source d'inventions pour les nouveaux matériaux et molécules nécessaires à la réalisation d'un certain nombre d'objectifs de développement durable. Selon l'OCDE (2010), les systèmes écologiques fournissent le capital naturel dont proviennent les matériaux. Ils comprennent les stocks de ressources renouvelables, tels que les forêts, les stocks de ressources non renouvelables (comme le pétrole ou les métaux), les milieux environnementaux (air, eau et terres) et les sources physiques

d'énergies renouvelables (rayonnement solaire, géothermie, vent, marées, etc.). *Les systèmes industriels* utilisent les services écosystémiques et obtiennent des matériaux à partir du capital naturel, qu'ils transforment en produits finis ou services marchands. Certains matériaux se retrouvent comme constituants de stocks dans des infrastructures, comme les bâtiments. Enfin, *les systèmes sociétaux* consomment les produits, les services et l'énergie fournis par les systèmes industriels et produisent des déchets, qui peuvent être recyclés et réintroduits dans les *systèmes industriels* ou déposés dans les systèmes écologiques. Par ailleurs, de nombreux systèmes sociétaux consomment directement des services écosystémiques et des stocks de ressources, tels que l'eau (OCDE, 2010).

Chaînes d'approvisionnement mondiales complexes et cycles de vie des produits

Du fait de la complexité des chaînes d'approvisionnement d'envergure mondiale, ainsi que du manque d'informations concernant les substances chimiques dans la production et dans les produits, il est difficile pour les fabricants de produits et les détaillants de savoir quelles substances sont rejetées dans le courant du cycle de vie des produits et en

Figure 2.3: **La complexité des chaînes d'approvisionnement mondiales : cas d'un produit électronique** (d'après Sourcemap, 2012)

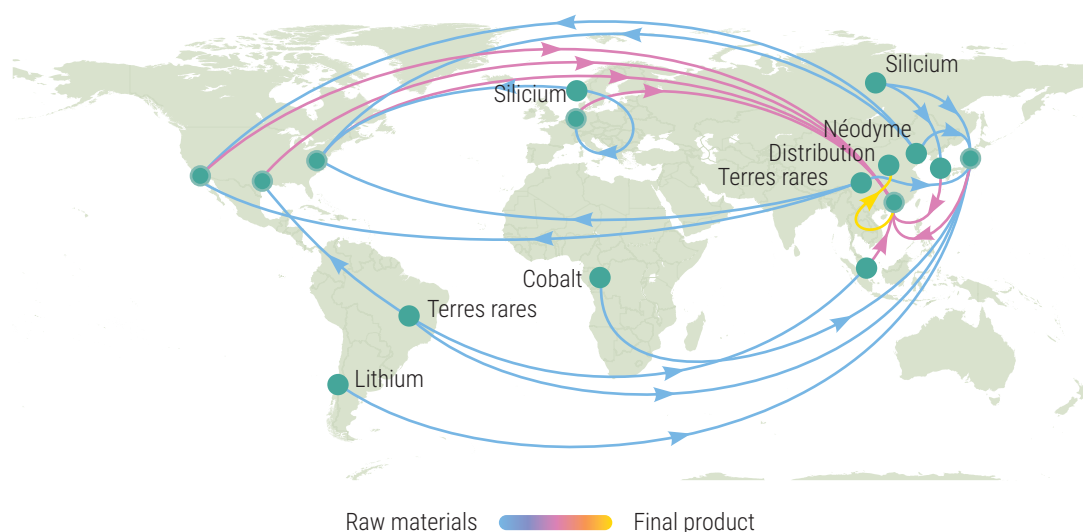
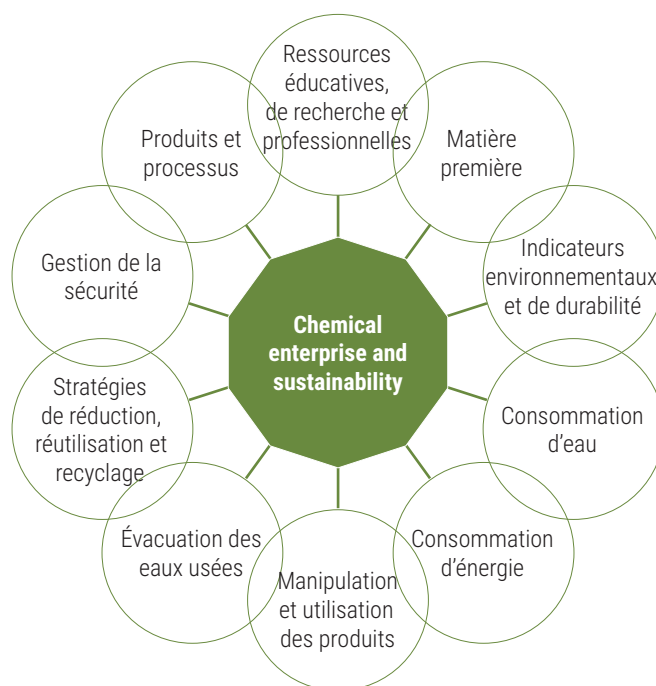


Figure 2.4: **Dimensions d'une entreprise du secteur chimique : vers la durabilité** (d'après Hill, Kumar et Verma, 2013, p. 27)



quelles quantités. De telles lacunes entravent la prise de mesures à toutes les étapes du cycle de vie d'un produit comme, par exemple, réduire autant que possible les rejets de substances chimiques pendant la production et l'exposition des travailleurs au stade de la fabrication, réduire l'exposition des consommateurs, ou encore réduire les émissions de produits chimiques pendant le recyclage et l'élimination finale. Ces lacunes dans les connaissances engendrent aussi des incertitudes pour les investisseurs. La chaîne d'approvisionnement pour un produit électronique présentée dans la figure ci-dessous illustre les complexités en tout point du globe des chaînes d'approvisionnement mondiales de ce secteur.

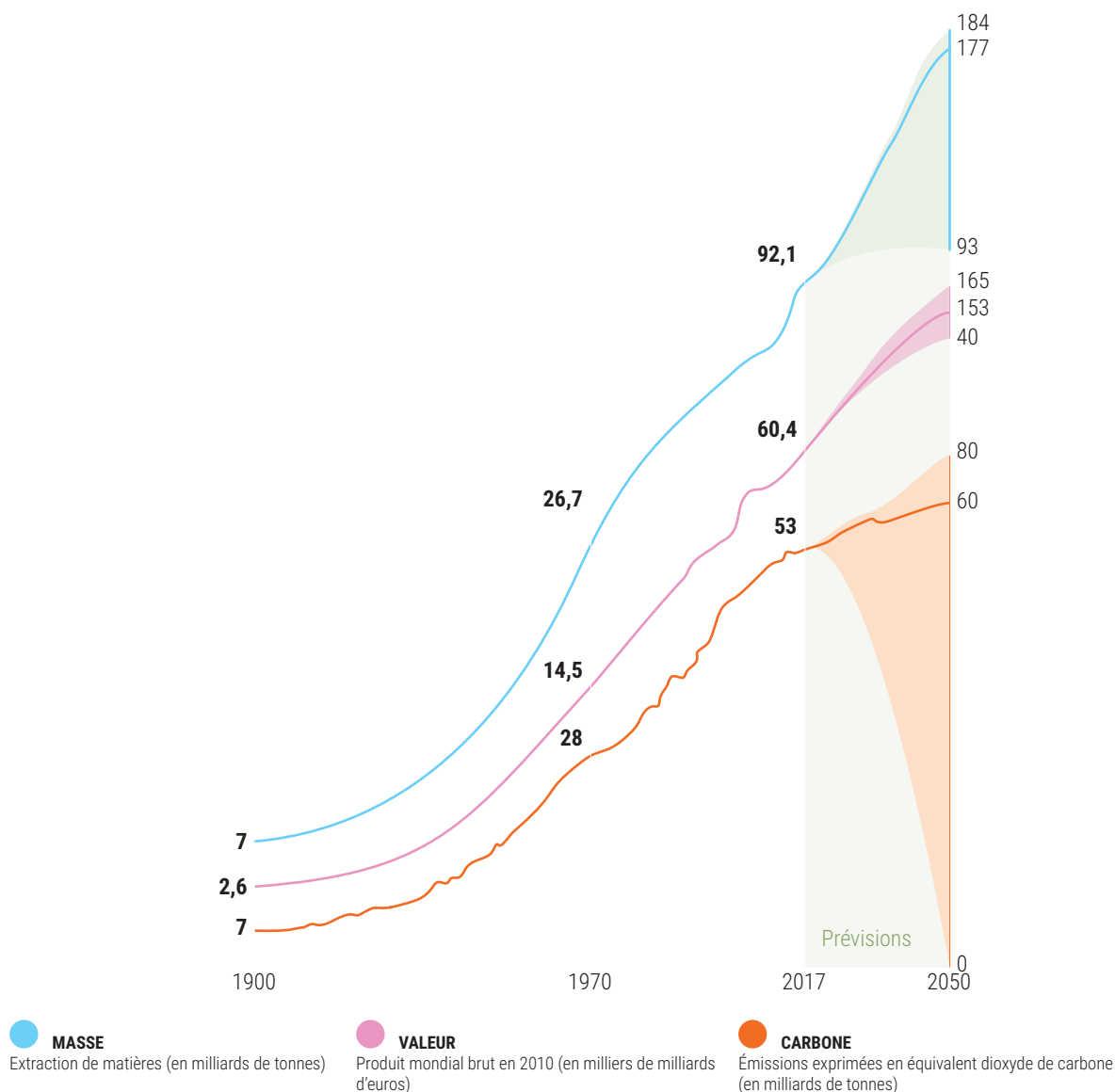
Dimensions multiples des entreprises du secteur chimique compromettant la durabilité

Les entreprises du secteur chimique — qu'il s'agisse d'une installation isolée, d'une marque, ou de l'industrie dans son ensemble — comportent de nombreuses dimensions interconnectées qui ont une incidence sur la durabilité. On peut citer à titre d'exemple l'approvisionnement en

matières premières durables, la consommation d'eau et d'énergie, la conception fonctionnelle, l'utilisation et la réutilisation, les systèmes de gestion de la sécurité tout au long de la chaîne d'approvisionnement mondiale, etc. La figure 2.4 offre un aperçu des thèmes pertinents (Hill, Kumar et Verma, 2013). Évaluer la durabilité de l'industrie chimique requiert donc davantage qu'une simple appréciation des dangers et des risques des substances chimiques et des processus de production.

Une autre question importante est celle de savoir comment accommoder les éventuels compromis d'un domaine à un autre, par exemple réduire les émissions de CO₂ en utilisant des matériaux composites qui ne sont pas forcément recyclables, ou utiliser des métaux lourds toxiques dans des dispositifs servant à produire de l'énergie renouvelable. De tels arbitrages potentiels s'appliquent également aux dimensions sociales. Une substance chimique moins nocive peut, par exemple, être produite dans des conditions de travail médiocres, ou encore utiliser comme ressources des minéraux provenant de zones de conflit. Pour ce type de questionnements, avoir recours à des outils tels que des évaluations tenant

Figure 2.5: Tendances de l'extraction de matières, de la création de valeur financière et des émissions de gaz à effet de serre de 1900 à 2050 (d'après De Wit et al., 2019, p. 11)

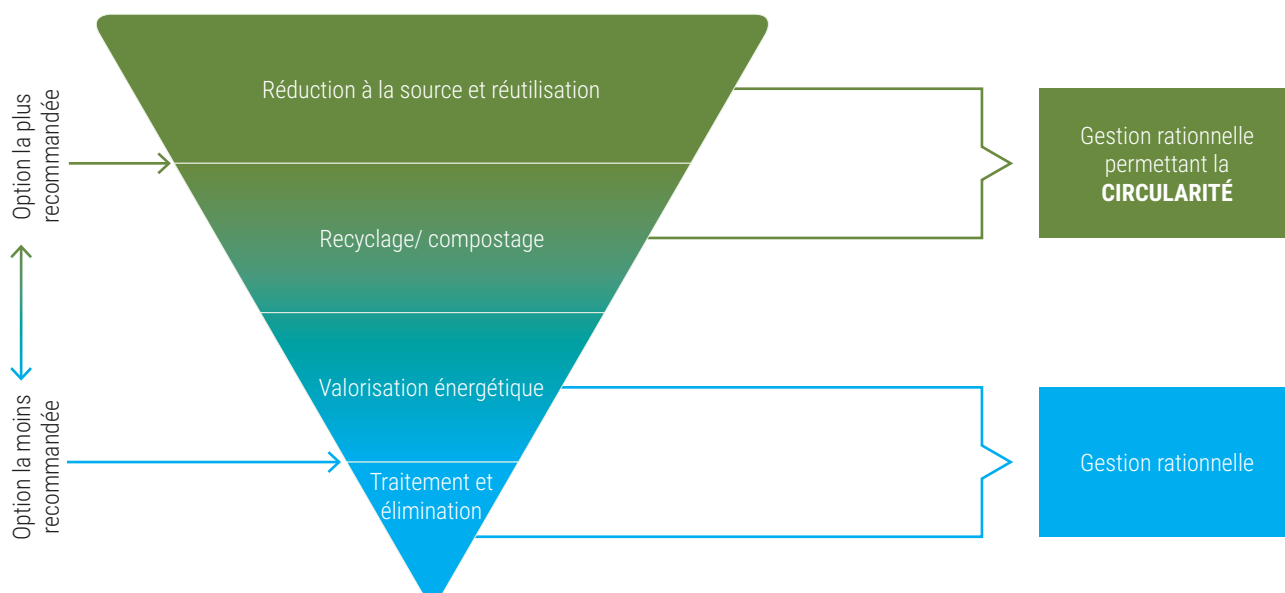


compte du cycle de vie ou des évaluations sociales peut apporter des éléments précieux (voir chap. 5).

Si les discussions sur la chimie verte et durable se concentrent souvent sur les propriétés intrinsèques des substances chimiques, des processus et des produits (c'est-à-dire en cherchant à réduire autant que possible les dangers qu'elles présentent et pourraient présenter), il est également pertinent d'envisager plus largement toutes les étapes du cycle de

vie des substances chimiques et des produits (en choisissant, par exemple, une fabrication extrinsèque) pour ce qui est de la réalisation des objectifs de développement durable. Ainsi, les substances chimiques non dangereuses conçues selon les principes de la chimie verte ne vont pas forcément soutenir des critères de durabilité plus vastes si elles sont utilisées dans la fabrication de produits non durables (c'est-à-dire contribuant aux changements climatiques).

Figure 2.6: **La hiérarchie des déchets : moteur potentiel d'une gestion durable des matériaux et d'une économie circulaire** (d'après United States Environmental Protection Agency [US EPA], 2017)



Défis de la durabilité associés aux matériaux, produits et flux de déchets

Selon les données présentées dans le rapport du Groupe international d'experts sur les perspectives des ressources mondiales en 2019 (Oberle *et al.*, 2019), environ 92 milliards de tonnes de matériaux ont été extraites dans le monde en 2017. Le rapport prévoit également que le taux d'extraction atteindra 190 milliards de tonnes d'ici 2060 et souligne qu'un volume inférieur à 10 % des ressources extraites est actuellement recyclé. L'ampleur du flux de ressources matérielles du secteur chimique représente une dimension importante des flux mondiaux de matériaux. En 2015, environ 1,7 milliard de tonnes de matières premières et de réactants secondaires ont permis d'obtenir approximativement 820 millions de tonnes métriques de produits chimiques, et généré quasiment la même quantité de sous-produits (tels que des solvants organiques). Les processus de production associés à ces flux de matériaux continuent de provoquer d'importants rejets de substances chimiques dans l'air, l'eau et le sol, ainsi que de grandes quantités de déchets, y compris des déchets dangereux. Dans la fabrication de

produits pharmaceutiques, par exemple, au moins 25 kilogrammes (kg) d'émissions et de déchets (et parfois plus de 100 kg) sont générés par kg de produit, ce qui met en lumière des inefficacités dans l'utilisation des ressources (Sheldon, 2017).

De nombreux articles et produits présents sur le marché contiennent des centaines de substances ou produits chimiques aux propriétés dangereuses, ce qui suscite des préoccupations en raison de leurs émissions et rejets et des effets potentiels sur la santé ou l'environnement. Parmi les exemples cités dans le rapport GCO-II figurent le formaldéhyde présent dans les shampoings, les microbilles dans les dentifrices ou les lotions, les phtalates dans les emballages alimentaires, certains retardateurs de flamme dans les téléviseurs ou encore les agents antimicrobiens (comme le triclosan) dans les savons. La contamination chimique des produits peut également empêcher l'utilisation circulaire des matériaux et la conformité avec les principes de la hiérarchie des déchets, qui préconisent, par ordre de priorité : la réduction à la source, la réutilisation, puis le recyclage. Les innovations en matière de chimie verte et durable peuvent aider à mettre en œuvre ces principes.

Répondre aux besoins fondamentaux des êtres humains tout en protégeant l'environnement et la santé humaine

La charge de plus en plus lourde que représentent la pollution chimique et les déchets ainsi que la croissance soutenue de l'industrie chimique (et son inaptitude à gérer les cycles de vie des produits de façon complètement durable) sont des questions étroitement liées les unes aux autres découlant des modes de consommation d'une population toujours plus nombreuse qui utilise de plus en plus de matières à mesure que ses moyens financiers augmentent. Au cœur de cette question se trouve la nécessité d'évaluer la manière de répondre aux besoins fondamentaux des êtres humains tout en protégeant l'environnement et la santé humaine. Reconnaître cette nécessité peut constituer un grand pas en avant en matière de promotion de modes de consommation et de production et de modes de vie plus durables. L'enjeu tient à envisager et développer un système dans lequel les connaissances sur la chimie verte et durable et l'utilisation de celle-ci peuvent servir les besoins humains d'une façon plus intentionnelle et plus durable.

La chimie et le Programme de développement durable à l'horizon 2030

Le Programme de développement durable à l'horizon 2030 a été adopté par l'Assemblée générale des Nations Unie en 2015. Il souligne que le développement doit être compatible avec les trois dimensions du développement durable (économique, sociale et environnementale). La nature intégrée et indissociable du développement durable signifie que celui-ci doit être mis en œuvre globalement, et non pas de façon compartimentée. Dans le même temps, la récente pandémie de COVID-19 montre à quel point nos systèmes mondiaux sont fragiles, à commencer par les chaînes d'approvisionnement, ce qui soulève la question de savoir comment intégrer des considérations de résilience à la durabilité. La figure 2.7 présente les trois dimensions du développement durable comme trois systèmes interdépendants, la biosphère servant de socle pour le développement des sociétés et des économies.

La gestion rationnelle des produits chimiques et des déchets fait partie intégrante des 17 objectifs de développement durable (ODD) et concerne chacun d'entre eux, fournissant des orientations pour la chimie verte et durable et formant un concept universel. Les cibles 12.4 et 3.9 des ODD ont un lien direct avec un ensemble de questions relatives à la gestion des produits chimiques et des déchets. L'objectif de développement durable numéro 9 (ODD 9) est tout aussi important car il encourage le développement d'infrastructures résilientes, l'industrialisation inclusive et durable et l'innovation générant des emplois et des revenus. D'autres ODD requièrent une chimie plus sûre, tels que la cible 6.3 sur l'amélioration de la qualité de l'eau. Enfin, certains ODD et leurs cibles sont directement pertinents pour les secteurs industriels à forte consommation de produits chimiques, par exemple ceux qui concernent l'accès à la nourriture, à l'énergie propre et à un logement sûr. Une caractéristique commune de tous les ODD (et leurs cibles) est qu'ils ne peuvent être atteints sans la gestion rationnelle des produits chimiques et des déchets et sans innovations durables en matière de chimie. Ces ODD constituent donc un solide point de référence et ouvrent la voie à la promotion du programme de la chimie verte et durable.

Garantir que les innovations répondent aux critères de durabilité

Les innovations récentes dans le domaine de la chimie et des matériaux avancés ont créé des possibilités nouvelles tout au long de la chaîne de valeur pour promouvoir la durabilité, parmi lesquelles : révolutionner le stockage de l'énergie et l'élaboration des batteries ; créer des matériaux de construction durables ; améliorer les capacités de recyclage et la biodégradabilité d'un certain nombre de produits ; transformer le dioxyde de carbone et les déchets en matières premières chimiques. Les innovations plus vertes et plus durables se situant à l'intersection de la chimie, de la biologie et de l'informatique sont particulièrement prometteuses (PNUE, 2019b).

Pour veiller à ce que les innovations en matière de chimie soient pleinement compatibles avec le Programme de développement durable à l'horizon 2030, il est essentiel de mettre au point

Figure 2.7: **Les trois dimensions de la durabilité** (d'après Centre de résilience de Stockholm, 2016)

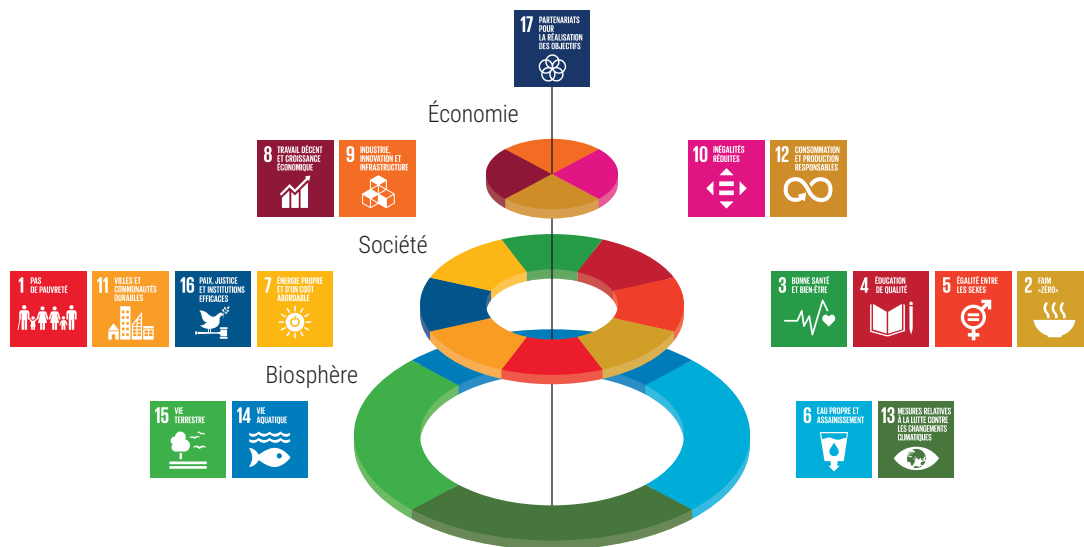














Figure 2.8: **Linkages between chemicals and waste and the SDGs** (adapted from Inter-Organization Programme for the Sound Management of Chemicals [IOMC] 2018, p. 3)



et d'utiliser des critères de durabilité solides pour évaluer des innovations données. Appliquer ces critères de manière systématique aiderait à exploiter pleinement le potentiel de la chimie

pour faire progresser la durabilité et contribuer à la mise en œuvre de l'ODD 12 sur la consommation et la production durables, ainsi que d'un certain nombre d'autres ODD et cibles (voir Tableau 2.1).

Tableau 2.1: **ODD et cibles pertinents pour la chimie verte et durable** (d'après PNUE, 2019b, p. 644)

Secteurs	Cibles des ODD	Exemples de perspectives de gestion et d'innovation
Agriculture et sécurité alimentaire	 Cible 2.4 : viabilité de la production alimentaire	Intensification de la lutte intégrée contre les ravageurs et des approches agro-écologiques, y compris élaboration et utilisation de solutions de remplacement non chimiques et d'autres bonnes pratiques agricoles
Santé	 Cible 3.8 : médicaments et vaccins sûrs	Gestion rationnelle des produits pharmaceutiques et désinfectants qui contribuent à la résistance aux agents antimicrobiens
Énergie	 Cible 7.a : recherche et technologies relatives à l'énergie propre	Amélioration des technologies utilisant des matériaux durables et économes en ressources lors de la décarbonation du secteur de l'énergie
Infrastructure	 Cible 9.1 : infrastructures durables	Réduction de l'utilisation de matières premières et de la production de déchets grâce aux matériaux avancés sans créer de répercussions futures
Industrie	 Cible 9.2 : industrialisation durable	Garantie du recours, par les industries à forte consommation de produits chimiques, aux meilleures techniques disponibles et aux meilleures pratiques environnementales
Logement	 Cible 11.1 : logement sûr	Réduction de la pollution de l'air intérieur par une isolation plus sûre et remplacement des matériaux de construction préoccupants (par ex., amiante)
Transport	 Cible 11.2 : systèmes de transport viables	Promotion de la mobilité propre, basée par exemple sur des solutions de chimie durable pour les batteries
Tourisme	 Cible 8.9 : tourisme durable	Adoption de pratiques visant à réduire l'empreinte chimique des services touristiques
Extraction minière	 Cible 12.2 : utilisation rationnelle des ressources naturelles	Tout en assurant avant tout la gestion rationnelle des résidus miniers, ceux-ci sont réutilisés et réintroduits dans l'économie dans la mesure du possible
Travail	 Cible 8.8 : sécurité sur le lieu de travail	Amélioration de l'évaluation des risques des substances chimiques préoccupantes et promotion des investissements dans la chimie verte et durable afin de réduire les expositions professionnelles aux substances dangereuses
Éducation	 Cible 4.7 : éducation en faveur du développement durable	Intégration de la chimie verte et durable dans les programmes d'enseignement pertinents
Financement	 Cible 17.3 : ressources financières de diverses provenances	Renforcement de l'utilisation des indicateurs de la chimie verte et durable en tant que critères pour l'investissement

2.2 L'évolution de la compréhension des concepts de chimie verte et de chimie durable

Chimie verte : un élément fondateur de la chimie durable

L'expression « chimie verte » est apparue au début des années 1990. À l'époque, son emploi s'était répandu après avoir reçu la reconnaissance et l'appui de l'agence américaine pour la protection de l'environnement (US EPA) (Linthorst, 2010), notamment via l'intensification des échanges d'informations entre secteur public et secteur privé, l'encouragement des innovations, la création de visibilité (remises de prix annuelles) et la constitution de réseaux visant à amener les produits innovants sur le marché. Une évolution similaire s'est produite en Europe, où des

considérations compatibles avec la « chimie verte » ont été incorporées dans la directive du Conseil relative à la prévention et à la réduction intégrées de la pollution (Commission européenne, 1996). Le rapport intitulé « Chemistry for a Clean World » (Chimie pour un monde propre) publié en 1993 par le Conseil de chimie des Communautés européennes, ainsi que les conférences sur le concept « Benign by Design » (conçu pour être inoffensif) (Linthorst, 2010) ont également joué un rôle déterminant. D'autres concepts connexes élaborés à la même période comprennent la production propre, les produits plus sûrs et l'utilisation de matières premières renouvelables (Clark, 2006 ; Mubofu, 2016).

1. **Prévention** : il vaut mieux éviter de générer des déchets qu'en produire et devoir ensuite les traiter ou s'en débarrasser.
2. **Économie d'atomes** : les méthodes de synthèse devraient être conçues de façon à maximiser l'incorporation dans le produit final de tous les matériaux utilisés au cours du processus.
3. **Méthodes de synthèse moins dangereuses** : dans la mesure du possible, les méthodes de synthèse devraient être conçues de façon à utiliser et produire des substances peu ou pas toxiques pour l'homme et l'environnement.
4. **Conception de produits chimiques plus sûrs** : les produits chimiques devraient être conçus de façon à remplir effectivement leur fonction tout en réduisant autant que possible leur toxicité.
5. **Solvants et autres auxiliaires moins dangereux** : l'utilisation de substances auxiliaires (solvants, agents de séparation) devrait être rendue superflue dans la mesure du possible et inoffensive lorsqu'elle est nécessaire.
6. **Conception axée sur le rendement énergétique** : les impacts environnementaux et économiques de la consommation d'énergie des processus chimiques devraient être reconnus et réduits au minimum. Dans la mesure du possible, les opérations de synthèse devraient s'effectuer à température et pression ambiantes.
7. **Utilisation de matières premières renouvelables** : les matières premières utilisées devraient être renouvelables, plutôt que susceptibles de s'épuiser, lorsque c'est techniquement et économiquement possible.
8. **Réduction du nombre de dérivés** : la multiplication inutile des dérivés (utilisation de groupes de blocage, protection/déprotection, modification temporaire des processus physiques ou chimiques) devrait être réduite ou évitée autant que possible, car elle nécessite des réactifs supplémentaires et peuvent produire des déchets.
9. **Catalyse** : l'utilisation d'agents catalytiques (aussi sélectifs que possible) est préférable à celle de réactifs stœchiométriques.
10. **Conception axée sur la dégradation** : les produits chimiques doivent être conçus de telle sorte qu'à la fin de leur vie, ils se décomposent en produits de dégradation non nocifs et biodégradables.
11. **Analyses en temps réel visant à prévenir la pollution** : les méthodes d'analyse doivent être perfectionnées afin de permettre la surveillance et le contrôle en temps réel des opérations en cours avant toute formation de substances dangereuses.
12. **Une chimie fondamentalement plus fiable visant à prévenir les accidents** : les substances utilisées dans un processus chimique et leur état physique devraient être choisis de façon à réduire autant que possible les risques d'accidents chimiques, y compris les rejets, les explosions et les incendies.

En 1998, Anastas et Warner ont défini la chimie verte comme l'utilisation d'un ensemble de principes permettant de réduire ou d'éliminer l'usage ou la production de substances dangereuses dans la conception, la fabrication et l'application des produits chimiques et ont établi les 12 principes de la chimie verte (Anastas et Warner, 1998). En 2003, ces 12 principes ont été complétés par les 12 principes de l'ingénierie verte (Anastas et Zimmerman, 2003). La Société américaine de chimie (ACS) fournit une brève explication de chacun des 12 principes de la chimie verte, ainsi que des orientations pour rendre plus vertes les substances ou les réactions chimiques (ACS, 2020a). Dans le même temps, de nombreux pays du monde se sont impliqués dans la création de réseaux pour la chimie verte et ont adopté des déclarations de politique en faveur de la chimie verte.

Chimie : le fondement moléculaire du développement durable

Chemists are “molecular architects”. They design Les chimistes sont des « architectes moléculaires ». Ils conçoivent des molécules à partir desquelles sont produits des matériaux et des biens permettant de répondre aux besoins et aux exigences humains. Une société durable, toutefois, repose sur des produits et processus chimiques conçus pour être favorables à la vie (Zimmerman *et al.*, 2020) et non pour poser un risque potentiel à la santé des êtres humains et des écosystèmes à court et à long terme. Les 12 principes de la chimie verte et les 12 principes de

l'ingénierie verte mettent donc les chimistes et les autres scientifiques au défi de prendre en compte les propriétés inhérentes des molécules chimiques au stade de la conception. Le terme « concevoir » sous-entend une intention (Anastas et Zimmerman, 2016). Il est utile d'évaluer, à un stade précoce de la conception, si les composés et les processus sont, par exemple, renouvelables ou s'ils contribuent plutôt à l'épuisement des ressources, s'ils sont toxiques ou inoffensifs, et s'ils sont persistants ou facilement dégradables (Zimmerman *et al.*, 2020).

Un aspect important de la chimie verte est la conception de substances et de processus moins nocifs qui imitent ceux observés dans la nature et s'obtiennent dans des conditions naturelles, c'est-à-dire ne nécessitant pas de chaleur ou de pression élevée pour catalyser les réactions. Ainsi, contrairement aux réactions de substitution faisant appel à des réactifs organiques halogénés traditionnellement utilisés dans l'industrie chimique, la nature a souvent recours à des « contorsions géométriques » pour faire réagir de façon spécifique et sélective des substrats par ailleurs non réactifs, en produisant peu ou pas de déchets (Anastas et Zimmerman, 2016). Le tableau 2.2 fournit quelques exemples des différences entre l'approche classique et celle de chimie verte et biomimétique.

Les travaux de recherche alignés sur les principes de la chimie verte ont permis de nombreuses évolutions dans des domaines tels que les solutions moins toxiques de conception de produits et

Tableau 2.2: **Chimie classique et chimie verte et biomimétique** (Van Hamelen, 2018, p. 6)

Chimie classique	Chimie verte et biomimétique
<ul style="list-style-type: none">▶ Les réactions se font à haute température et haute pression et sont suivies de traitements (« heat, beat, treat »)▶ Solvants organiques▶ Matières premières et énergie fossiles▶ Une pureté élevée des matières premières est impérative▶ Utilisation de tous les éléments du tableau périodique▶ Les ressources proviennent du monde entier▶ La maîtrise des risques se fait en adoptant des mesures de précaution	<ul style="list-style-type: none">▶ Les réactions se font à température et pression ambiantes▶ Eau comme solvant▶ Réactions chimiques à faible énergie d'activation▶ Matières premières locales, sources diverses▶ La dégradation fait partie intégrante de la conception : « dégradation programmée » à partir d'une « instabilité déclenchée » (John Warner) ; « processus de désassemblage de la nature » (Janine Benyus)▶ La fonctionnalité est créée par la structure et non par le matériau lui-même▶ Les systèmes vivants n'utilisent que 25 éléments ; le carbone, l'oxygène et le sodium représentent 96 % des atomes qui les composent ; les éléments restants se rencontrent à l'état de traces▶ La maîtrise des risques se fait en adoptant les propriétés inhérentes des matériaux

préparations chimiques, les produits chimiques biosourcés, les matières premières renouvelables, les solvants et agents réactifs plus sûrs / moins toxiques, l'économie d'atomes, ou encore les polymères verts (Anastas et Warner, 1998 ; Philp, Ritchie et Allan, 2013). Environ 25 ans après la publication des 12 principes de la chimie verte, de nombreux articles et revues scientifiques font état de la manière dont la chimie verte améliore la salubrité et la sûreté de l'environnement et apporte des avantages sur les plans de l'économie et de la compétitivité. On citera, à titre d'exemple, le numéro spécial de la revue de la Société américaine de chimie qui se penche sur les acquis de 25 ans de chimie et d'ingénierie vertes pour bâtir un avenir durable (« Building on 25 Years of Green Chemistry and Engineering for a Sustainable Future », Anastas et Allen, 2016), la publication de la Société américaine de chimie consacrée à la manière dont les applications industrielles de la chimie verte transforment notre monde (« How Industrial Applications in Green Chemistry Are Changing Our World », ACS 2015a), et diverses publications du Green Chemistry & Commerce Council (sans date).

Certes riches en informations et précis, les 12 principes de la chimie verte ne se veulent toutefois pas prescriptifs et ne sont pas destinés à être appliqués dans un certain ordre ou selon un barème de pondération donné. Par conséquent, il n'existe pas d'accord sur le nombre de ces principes devant être mis en œuvre pour qu'une molécule ou un procédé puisse prétendre au qualificatif de « vert(e) » (Zuin, 2016). L'intention est de rendre la chimie plus respectueuse de l'environnement, et les principes sont censés être un moyen d'y parvenir. Essentiellement, le propos de la chimie verte est d'encourager les améliorations continues de la performance en matière d'innovations pour protéger la santé humaine et l'environnement, les 12 principes servant de référence pratique, ce qui a créé un cadre souple favorisant les engagements à agir et un processus d'apprentissage par rapport à ces engagements. L'utilisation et le respect des 12 principes est un facteur de motivation important pour les chercheurs en chimie et pour les entreprises du secteur chimique, du fait des possibilités de gratification qu'ils offrent. C'est cette approche alliant encouragement et

souplesse qui est l'un des facteurs essentiels du succès mondial du concept de chimie verte.

Une perspective plus large et holistique : la chimie durable

La notion de chimie durable a été promue par l'OCDE à la fin des années 1990 (OCDE, 2012) et au début des années 2000 (Office fédéral allemand de l'environnement, 2009). L'OCDE a défini la chimie durable comme un concept scientifique qui vise à améliorer l'efficacité avec laquelle les ressources naturelles sont utilisées pour répondre aux besoins humains en matière de produits chimiques et de services associés (OCDE, 2018). Selon cette perspective, la chimie durable englobe la conception, la fabrication et l'utilisation de produits chimiques et de procédés efficaces, efficaces, sûrs et moins nocifs pour l'environnement. Elle stimule l'innovation dans tous les secteurs pour concevoir et découvrir de nouveaux produits chimiques, de nouveaux procédés de production et de nouvelles pratiques de bonne gestion des produits qui augmentent la performance et la valeur tout en remplissant les objectifs de protection et d'amélioration de la santé humaine et de l'environnement. Au fil du temps, le champ d'application a été étendu pour inclure des aspects supplémentaires de la durabilité, tels que l'évaluation sur l'ensemble du cycle de vie, la conservation des ressources, la promotion de la réutilisation et du recyclage, l'application de la responsabilité sociale des entreprises et l'inclusion des utilisateurs finaux comme les consommateurs (Bazzanella, Friege et Zeschmar-Lahl, 2017).

Si la chimie verte est caractérisée et guidée par des principes scientifiques axés sur les innovations en matière de chimie, les récents débats consacrés à la chimie durable indiquent un concept plus large et une interprétation plus globale, prenant en compte les dimensions économiques, environnementales et sociales. Reconnaisant l'interdépendance des systèmes imbriqués (par exemple l'économie imbriquée dans la société, elle-même imbriquée dans la biosphère), la chimie durable couvre un éventail plus vaste de thèmes, parmi lesquels : les procédés de fabrication avancés, les conditions de travail sûres, les communautés locales et les droits de l'homme, les modes de consommation et

Figure 2.9: Le tableau périodique des éléments de la chimie verte et durable (Anastas et Zimmerman, 2019, p. 6546)

Buts humanitaires		Chimie verte et ingénierie verte							
1 A Technologies appropriées pour le monde en développement	Prévention des déchets								
3 Cw Chimie au service du bien-être	4 Dd Conception visant à éviter les dépendances								
11 Sw Accès fiable à une eau salubre	12 Fg Garantir l'accès aux ressources matérielles des générations futures	Économie d'atomes	Synthèses moins dangereuses	Conception moléculaire		Solvants et autres auxiliaires	Énergie	Matières premières renouvelables	
19 Bf Chimie au service d'une production alimentaire et d'une nutrition non toxiques	20 Tc Transparence de la communication relative aux produits chimiques	21 Wu Utilisation et valorisation des déchets	22 Sa Autoassemblage moléculaire	23 Ru Réduire l'utilisation des matériaux dangereux	24 Dg Directives de conception	25 Aq Solvants aqueux et biosourcés	26 Ee Synthèse et traitement utilisant rationnellement l'énergie et les matériaux	27 Ib Bioraffinerie intégrée	
37 J Garantir la justice environnementale, la sécurité et l'égalité des chances	38 Cs Chimie pour une construction et des bâtiments durables	39 Op Synthèse monotope	40 Ip Processus intégrés	41 Gc Production et consommation <i>in situ</i> des matériaux dangereux	42 Cm Modèles <i>in silico</i>	43 Il Liquides ioniques / solvants non volatils	44 R Intrants d'énergie renouvelable / sans carbone	45 C Dioxyde de carbone et autres matières premières en C ₁	
55 Pc Chimie en faveur de la préservation du carbone naturel et des autres cycles biogéochimiques	56 Ic Le code moléculaire d'un individu est la propriété de cet individu	57 Pi Optimisation des procédés	58 As Synthèse additive	59 Ch Fonctionnalisation de la liaison C-H	60 Ba Biodisponibilité / absorption, distribution, métabolisme et excrétion (ADME)	61 Sc Fluides sous-critiques et supercritiques	62 Es Matériaux pour le stockage et la transmission de l'énergie	63 Sb Biologie de synthèse	
73 Wo Zéro substance chimique alimentant la guerre ou l'oppression	74 Nc Les codes moléculaires de la nature sont la propriété du monde entier	75 Ss Séparation auto-induite	76 W Dérivés non covalents / transformation par l'interaction faible	77 Is Sûreté et sécurité inhérentes	78 Ts Criblage à haut débit (empirique/ <i>in vivo</i> / <i>in vitro</i>)	79 S Solvants « intelligents » (obéissants, accordables)	80 V Utilisation et valorisation de l'énergie produite à partir de déchets	81 Bt Transformation biologiquement facilitée	

d'élimination, les citoyens et l'éthique, ou encore les nouveaux modèles d'entreprises et de services (Blum *et al.*, 2017 ; Kümmerer, 2017). Veiller à ce que les produits chimiques soient gérés de façon rationnelle est l'une des conditions fondamentales pour une chimie durable.

Comme le souligne le rapport GCO-II, une étude récente menée par le Government Accountability Office des Etats-Unis (US GAO) sur les innovations en matière de chimie a identifié des thèmes communs en ce qui concerne « ce que la chimie durable s'emploie à réaliser », notamment :

- ▶ Améliorer l'efficacité de l'utilisation des ressources naturelles pour répondre aux besoins en produits chimiques des êtres humains tout en évitant de causer des dommages à l'environnement ;
- ▶ Réduire ou éliminer l'utilisation ou la production de substances dangereuses ;
- ▶ Protéger et servir l'économie, les populations et l'environnement grâce à des changements innovants en matière de chimie ;

			Conditions systémiques favorables					Objectifs nobles
			Cadres conceptuels	Economic and market forces	Indicateurs	Politiques et réglementations	Outils	3 Ho Serment d'Hippocrate pour la chimie
			5 B Biomimétisme	6 Cb Analyse coûts-avantages basée sur le cycle de vie	7 Ae Économie d'atomes	8 Pr Responsabilité élargie du producteur	9 Ea Analyse épidémiologique et santé des écosystèmes	10 P Conception pour les générations futures
		Mesures et prise de conscience	13 Ce Économie circulaire	14 Fc Calcul des coûts totaux	15 Ef Facteur E	16 Pb Réglementation basée sur les propriétés des substances	17 Aa Évaluation des solutions de remplacement	18 Lp Produits et procédés/ processus compatibles avec le vivant
Catalyse	Degradation							
28 E Enzymes	29 Bm Métabolites non toxiques	30 Sn Capteurs	31 Bd Conçu pour être inoffensif	32 Hc Taxe de nocivité/ taxe carbone	33 Ff Facteur F	34 Ct Transparence chimique	35 Lc Analyse du cycle de vie	36 Z Zéro déchet
46 Ac Catalyse utilisant des métaux abondants	47 Md Déclencheurs de la dégradation moléculaire	48 Co Contrôle et optimisation en cours de processus	49 Ie Écologie industrielle	50 Dc Taxation de l'exploitation des ressources	51 Ql Indicateurs qualitatifs	52 Cl Leasing chimique	53 So Filtres pour la sélection des solvants	54 Fi La chimie est équitable et pleinement inclusive
64 Ht Catalyse hétérogène	65 Dp Polymères et autres matériaux dégradables	66 Ex Exposomes	67 Tg Conception trans-générationnelle	68 Rf Financement continu de la recherche	69 Qn Indicateurs quantitatifs	70 Se Réglementations s'appliquant automatiquement	71 Cf Mesure de l'empreinte chimique	72 De Répartition équitable des bénéfices
82 Hm Catalyse homogène	83 Pd Outils de prédiction et de conception	84 Ga Chimie analytique verte	85 Be Bioéconomie	86 Ci Investissement de capitaux	87 Bb Charge corporelle chimique	88 I Écosystèmes propices à l'innovation, du laboratoire à la commercialisation	89 Et Enseignement de la toxicologie et de la pensée systémique	90 K Les connaissances extraordinaires dans le domaine de la chimie s'accompagnent d'une responsabilité extraordinaire

- Prendre en compte toutes les étapes du cycle de vie, y compris la fabrication, l'utilisation et l'élimination lors de l'évaluation de l'impact d'un produit sur l'environnement ; et
- Réduire autant que possible l'utilisation de ressources non renouvelables (US GAO, 2018).

Le « tableau périodique des éléments de la chimie verte et durable », récemment mis au point (Anastas et Zimmerman, 2019), repose sur les principes de la chimie verte et place celle-ci dans un contexte plus large de chimie durable et de viabilité. Dans ce

tableau périodique, la chimie verte et l'ingénierie verte fournissent les fondements scientifiques et technologiques des éléments de la chimie verte et durable du tableau. Ceux-ci sont complétés par d'autres éléments, tels que des buts humanitaires, des conditions systémiques favorables, ou encore des objectifs nobles. L'approche globalement adoptée dans le tableau fait valoir que parvenir à un avenir durable exige d'œuvrer à l'intersection des sciences et technologies et des écosystèmes humains, sociétaux, culturels, économiques, politiques, moraux et éthiques (Anastas et Zimmerman, 2019).

Une autre initiative récente visant à mieux faire comprendre la chimie durable est le processus de dialogue entre parties prenantes mis en place par le centre international de collaboration pour la chimie durable (International Sustainable Chemistry Collaborative Centre, ISC3), qui a permis de mettre en commun des perspectives, attentes et critères divers examinés dans le contexte de la chimie durable et qui est compatible avec une interprétation holistique du concept de durabilité (ISC3, 2020a).

Possibilités offertes par la chimie verte et durable pour promouvoir la circularité

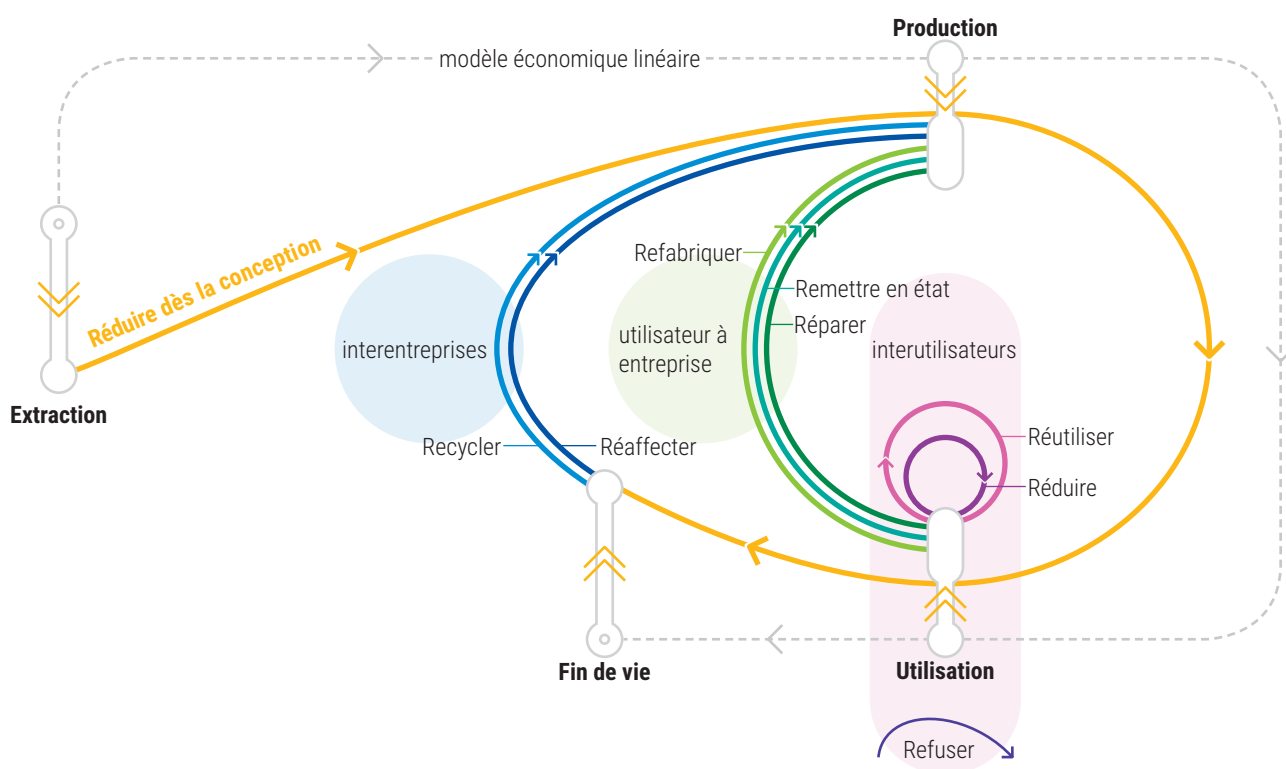
En 2020, la masse estimée de matériaux fabriqués par l'homme sur Terre a dépassé pour la première fois la biomasse totale de la planète (Elhacham *et al.*, 2020). Cet état de fait, associé à la raréfaction des ressources naturelles (des métaux, par exemple), fait croître la demande pour que des progrès soient accomplis sur la voie de la circularité.

La circularité est décrite par le PNUE, sur sa plateforme dédiée au sujet, comme incluant les processus présentés ci-dessous à la figure 2.10.

Cependant, de nombreux matériaux sont complexes et difficiles à récupérer ou à recycler. Les plastiques, par exemple, contiennent souvent des additifs (par exemple des plastifiants), des retardateurs de flamme, des agents de coloration ou des stabilisateurs UV, qui peuvent être dangereux et difficiles à isoler (Kümmerer, Clark et Zuin, 2020).

Les innovations en matière de chimie verte et durable peuvent jouer un rôle important dans la promotion d'une économie circulaire. Elles stimulent en effet la conception de molécules, de matériaux et de produits qui peuvent être plus facilement recyclés et surcyclés que ceux actuellement présents sur le marché. Cela peut se faire, par exemple, en cessant d'incorporer dans les produits des substances chimiques préoccupantes qui empêchent une récupération et un recyclage rationnels (PNUE, 2019b). Pour les produits qui sont

Figure 2.10: Comprendre et visualiser la circularité (PNUE, 2019c)



rejetés intentionnellement dans l'environnement et qui sont utilisés dans des applications en circuit ouvert (comme les pesticides, les cosmétiques, les biocides ou les produits pharmaceutiques), les innovations en matière de chimie verte et durable pourraient aider à concevoir des molécules et des matériaux qui se minéralisent rapidement dans l'environnement, tout en maintenant les fonctions souhaitées (Kümmerer, Clark et Zuin, 2020).

En vue de cultiver l'intégration de la chimie dans une économie circulaire, Kümmerer, Clark et Zuin (2020) formulent 15 propositions spécifiques, dont les suivantes : limiter la complexité des molécules et des produits au niveau minimal requis pour assurer les performances souhaitées ; concevoir les produits, y compris tous leurs additifs et autres composants, en vue de leur recyclage ; empêcher les matières premières de devenir critiques en réduisant leur utilisation et en améliorant l'efficacité de leur récupération et de leur recyclage (comme c'est le cas pour de nombreux métaux) ; garantir la traçabilité et envisager l'utilisation de passeports numériques de produits (incluant par exemple leur composition, leurs composants et les processus utilisés) ; garder les processus aussi simples que possible en réduisant autant que possible le nombre d'étapes, celui d'auxiliaires, la consommation d'énergie et les opérations unitaires. Ces propositions sont totalement compatibles avec les 10 objectifs de la chimie verte et durable présentés au chapitre 3 et les soutiennent.

Vers une définition élargie de la performance dans l'industrie chimique

On observe un mouvement croissant en faveur d'une transformation du secteur chimique adoptant pleinement ce que Zimmerman *et al.* (2020) appellent une « définition élargie de la performance qui inclut des considérations de durabilité ». Cette notion plus large va de la prise en compte des propriétés inhérentes des molécules à l'assurance que les composés, les procédés et les produits satisfont à des normes élevées de durabilité. Une telle transformation nécessitera des innovations allant au-delà des approches

classiques d'innovation chimique et fera intervenir une pensée et une conception systémiques dès le niveau moléculaire, résultant en un impact positif au niveau mondial (Zimmerman *et al.* 2020).

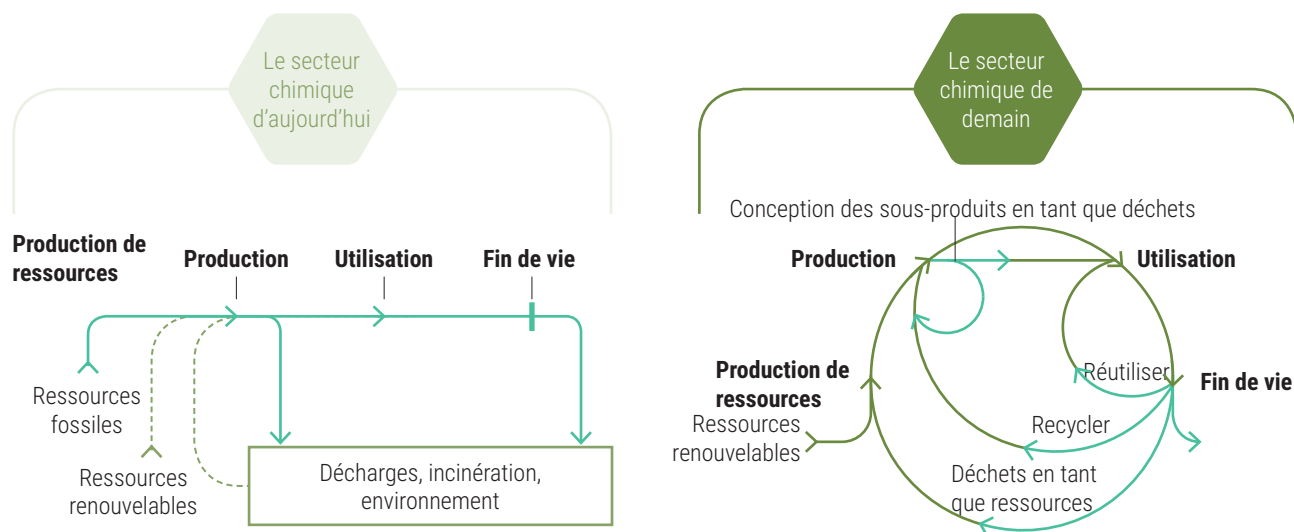
Possibilités offertes par la chimie verte et durable pour les secteurs industriels du futur

La chimie joue un rôle important dans de nombreux marchés finaux qui contribuent à façonner l'avenir du développement et du développement durable. On peut citer, à titre d'exemple, ceux du transport, du bâtiment, de l'agro-alimentaire et du conditionnement des aliments, ainsi que de la gestion des déchets. La figure 2.12 présente quelques exemples des contributions qu'elle apporte aux secteurs d'avenir pour le développement durable. Il est essentiel d'appliquer des considérations de chimie verte et durable dans les innovations pertinentes.

Le potentiel commercial de la chimie verte et durable







Bien qu'il existe des différences dans la manière d'analyser la chimie verte et durable, les données disponibles — même si elles sont limitées — suggèrent que l'offre et la demande de produits chimiques plus verts et plus durables connaissent une croissance importante. Selon les chiffres indiqués, l'industrie mondiale de la chimie verte avait une valeur marchande de plus de 50 milliards de dollars des États-Unis en 2015 (BCC Research, 2016), et celle-ci devrait augmenter pour atteindre 100 milliards en 2020 (Bernick, 2016). Les régions Asie-Pacifique, Europe occidentale et Amérique du Nord sont celles où la croissance du marché est la plus forte, comme l'illustre la figure 2.13 (Pike Research, 2011). D'après des recherches plus récentes, le marché mondial des produits chimiques verts va augmenter à hauteur de presque 50 milliards de dollars des États-Unis pendant la période 2019-2023, à un taux composé de croissance annuelle d'environ 10 % (Business Wire, 2019).

Figure 2.11: **Caractéristiques du secteur chimique d'aujourd'hui et de demain** (Zimmerman *et al.*, 2020, p. 4).



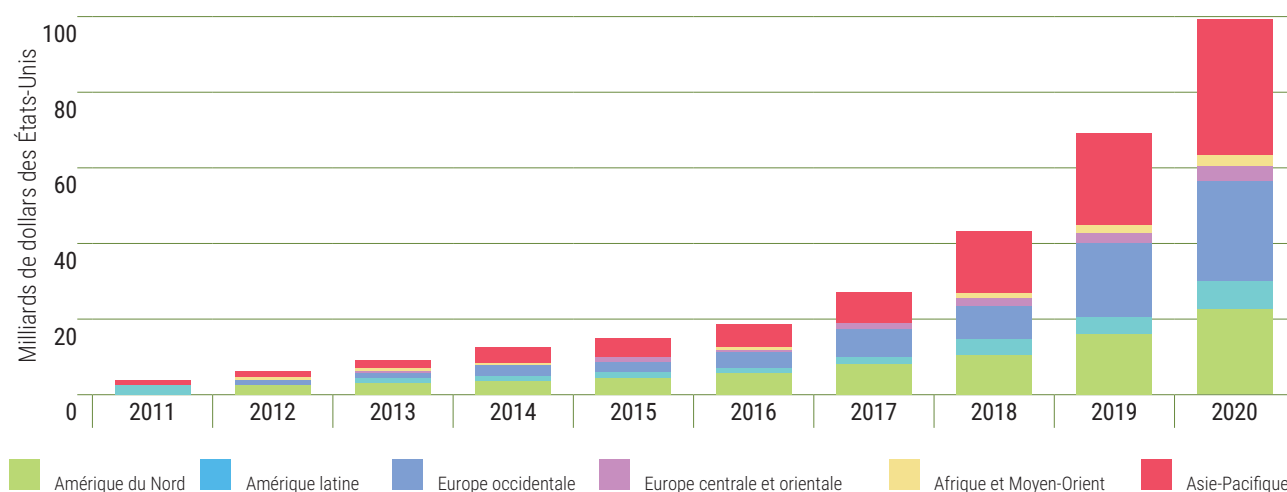
Processus principalement linéaires	→	processus circulaires
Matières premières fossiles	→	matières premières renouvelables
Réactifs et produits chimiques persistants ou toxiques	→	réactifs et produits chimiques non toxiques
Catalyse utilisant des métaux rares	→	catalyse utilisant des métaux abondants, des enzymes, des photons ou des électrons
Liaisons covalentes	→	interactions faibles, non covalentes
Solvants traditionnels	→	solvants verts peu toxiques, recyclables, inertes, abondants et facilement séparables, voire zéro solvant
Procédés d'isolement et de purification consommateurs d'énergie et de matériaux	→	systèmes de séparation auto-induite
Grande quantité de déchets	→	processus en peu d'étapes et économes en atomes et en solvants
Traitement des déchets	→	utilisation des déchets
Conception axée exclusivement sur la phase d'utilisation, dépendante du contrôle des circonstances	→	conception intentionnelle des molécules pour l'ensemble du cycle de vie
Performance = optimiser la fonctionnalité	→	performance = optimiser la fonctionnalité + réduire les dangers autant que possible
Production chimique maximale pour plus de profit	→	performance maximale, en utilisant un minimum de matériaux et des matériaux non toxiques, pour plus de profit

Figure 2.12: Exemples de la manière dont la chimie contribue aux secteurs appelés à jouer un rôle important à l'avenir (d'après Forum économique mondial [WEF], 2017, p. 7)

		Projected growth rates for key innovations	Examples of relevant products from chemistry and advanced materials
Mobilité	 Véhicules électriques	Ventes annuelles de véhicules électriques 2020: 4,9 millions de dollars des États-Unis	Plastiques, composites et technologies de batteries
	 Drones	Taille du marché pour les drones* 2015: 10,1 milliards de dollars des États-Unis 2020: 14,9 milliards de dollars des États-Unis	Plastiques, composites et technologies de batteries
Dispositifs mobiles et intelligents	 Smartphones et tablettes	Dispositifs mobiles en service 2015: 8,6 milliards de dollars des États-Unis 2020: 12,1 milliards de dollars des États-Unis	Substrat, fond, conducteurs transparents, films barrières et résines photosensibles
	 Technologie d'affichage flexible (par exemple : habitronique, réalité virtuelle, TV)	Marché pour la technologie d'affichage AMOLED** 2016: 2 milliards de dollars des États-Unis 2020: 18 milliards de dollars des États-Unis	Substrat, fond, conducteurs transparents, films barrières et résines photosensibles
Connectivité & informatique	 Internet à haut débit	Internet à large bande fixe 2015: 24,7 Mbps 2020: 47,7 Mbps	Chlorosilane pour le verre ultrapur
	 Circuits intégrés plus efficaces et de plus petite taille	Longueur des portes logiques du processeur 2015: 14 mm 2020: 7 mm	Diélectriques, silice colloïdale, résines photosensibles, amplificateurs de rendement et solvants de bourrelets de résine

* Secteurs de la défense, du commerce et de la sécurité intérieure ** Diode électroluminescente organique à matrice active

Figure 2.13: Marché mondial des produits chimiques verts par région de 2011 à 2020 (en milliards de dollars des États-Unis) (Pike Research, 2011)



Ce document est publié par la maison d'édition Mary Ann Liebert, Inc. et protégé par le droit d'auteur.



QUELS SONT LES RÉSULTATS ATTENDUS DE L'ACTION EN FAVEUR D'UNE CHIMIE VERTE ET DURABLE ? **OBJECTIFS ET PRINCIPES DIRECTEURS** >

Vision d'une chimie verte et durable	30
Objectifs et principes directeurs	30
Examen approfondi des 10 objectifs de la chimie verte et durable	33

Vision d'une chimie verte et durable

La vision d'une chimie verte et durable met en avant le fait que la chimie peut devenir pleinement compatible avec le Programme de développement durable à l'horizon 2030, ce qui implique, à terme, l'alignement complet de la chimie et de l'industrie chimique mondiale sur les dimensions environnementale, sociale et économique du développement durable. Cela suppose non seulement d'innover en vue d'une chimie plus verte et plus durable, mais aussi de résoudre les problèmes de toxicité et de persistance hérités des produits chimiques du passé, afin de réduire autant que possible les effets néfastes des substances chimiques et des produits tout au long de leur cycle de vie.

Un grand nombre d'ODD peuvent tirer parti des contributions directes de la chimie verte et durable, notamment l'objectif 2 (faim zéro), l'objectif 3 (santé et bien-être), l'objectif 6 (eau propre et assainissement), l'objectif 7 (énergie propre à un coût abordable), l'objectif 12 (consommation et production responsables) et l'objectif 13 (action climatique). En réduisant et/ou en éliminant les risques chimiques, les effets connexes sur l'environnement et la santé, ainsi que la pollution, la chimie verte et durable contribue également à d'autres ODD, par exemple l'objectif 8 (travail décent et croissance économique), l'objectif 9 (industrie, innovation et infrastructure), l'objectif 14 (vie aquatique) ou l'objectif 15 (vie terrestre).

Objectifs et principes directeurs

La vision d'une chimie verte et durable peut être atteinte en introduisant de nouvelles conceptions et des innovations chimiques pour faire en sorte que les substances chimiques, les matériaux, les produits et les procédés de production assurent les fonctions et services souhaités sans nuire à la santé humaine et à l'environnement, tout en atteignant des objectifs plus larges de développement. Le terme « innovation chimique », dans ce contexte, englobe les innovations aussi bien dans le domaine de la chimie (molécules/composés chimiques) et du génie chimique (procédés chimiques et production durable) que dans les domaines connexes (par ex. la mise au point de produits).

En dehors des 12 principes de la chimie verte et des 12 principes de l'ingénierie verte, il n'existe

pas de cadre de référence permettant de mieux comprendre ce que recouvre la « chimie verte et durable ». Par ailleurs, il n'existe aucun ensemble de critères convenus pour déterminer dans quelle mesure un produit chimique ou un procédé industriel est « vert » ou « durable » (PNUE, 2019b).

Le présent manuel-cadre vise à promouvoir une meilleure compréhension, en présentant 10 objectifs et principes directeurs de la chimie verte et durable destinés à encourager et inciter les acteurs à imprimer une orientation verte et durable à leurs activités d'innovation chimique. Les objectifs sont donnés aux parties prenantes impliquées dans l'innovation, la gestion et l'élaboration de politiques dans le domaine de la chimie, qui comprennent, entre autres, les chimistes, ingénieurs chimistes,

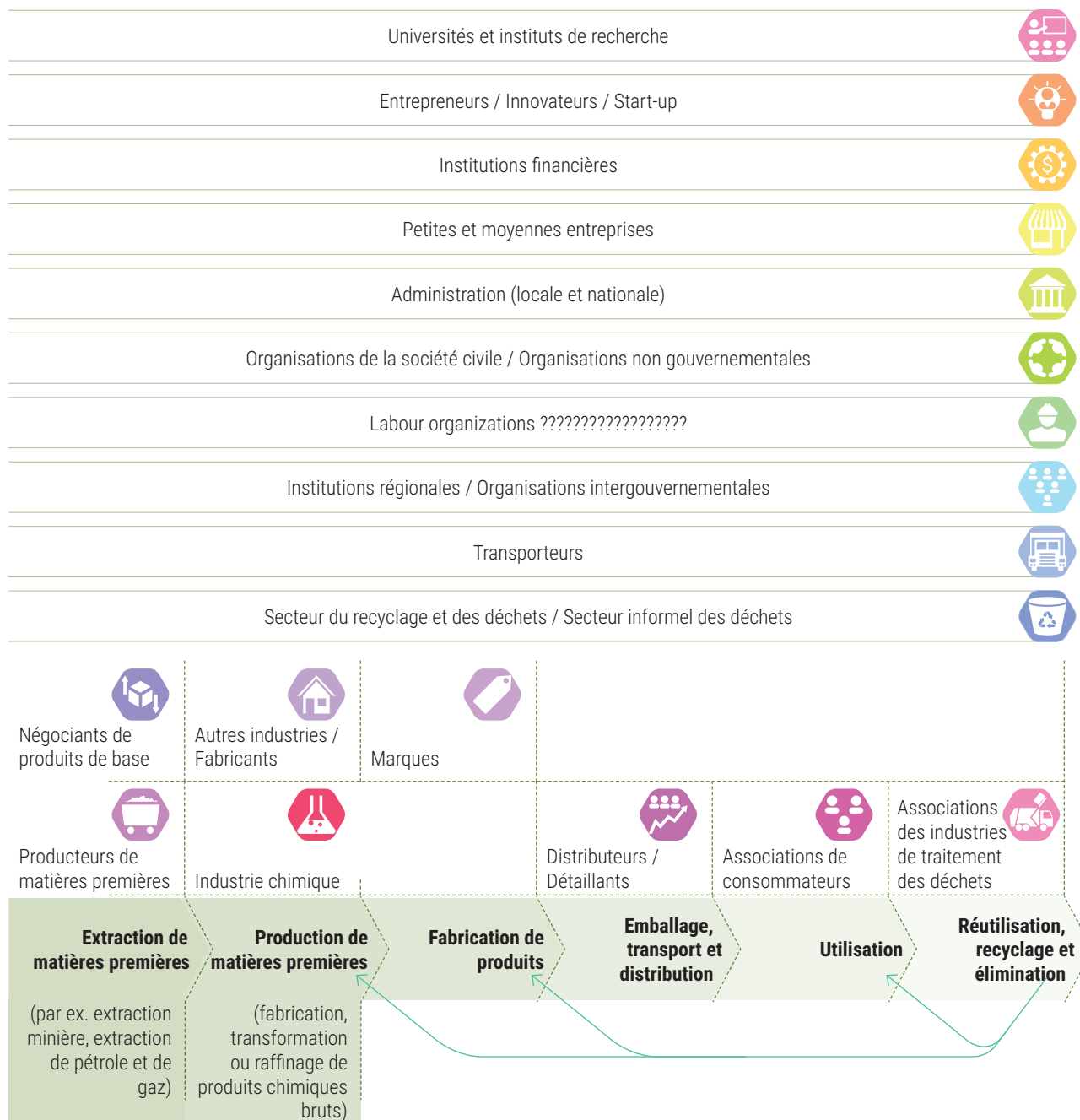
concepteurs de produits, décideurs du secteur privé, gouvernements et autres groupes de parties prenantes, et les utilisateurs et consommateurs. La Figure 3.1 présente les parties prenantes de la chaîne de valeur de la chimie verte et durable

ainsi que les publics cibles, en s'appuyant sur une cartographie similaire de la chaîne de valeur des plastiques tirée de Ryberg, Laurent et Hauschild (2018).

Figure 3.1: The 10 green and sustainable chemistry objectives

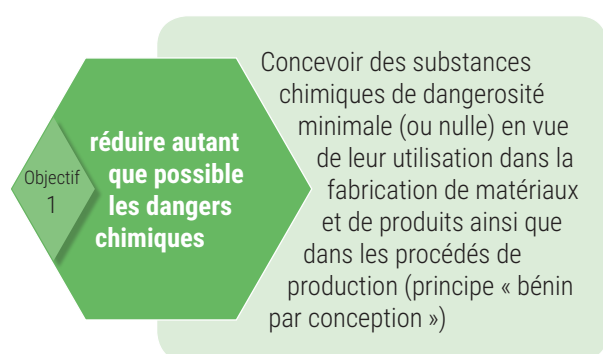


Figure 3.2: **Parties prenantes de la chaîne de valeur de la chimie verte et durable et publics cibles**
(d'après Ryberg, Laurent et Hauschild, 2018, p. 10)

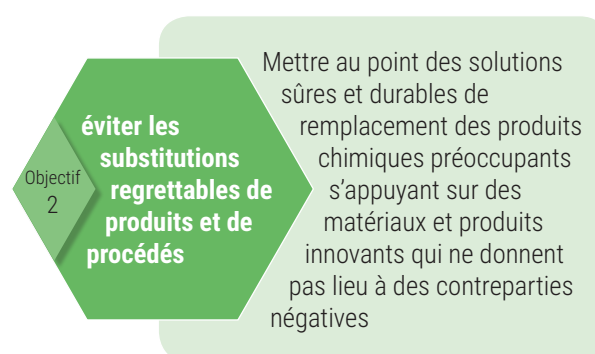


Examen approfondi des 10 objectifs de la chimie verte et durable

Les sections suivantes présentent chacun des 10 objectifs et principes directeurs, qui vont de la modélisation moléculaire basée sur les principes de la chimie verte, aux mesures à adopter pour garantir que les innovations chimiques répondent aux besoins sociétaux. Chaque objectif est introduit par une ligne explicative. Il est ensuite fait mention des groupes cibles pour qui l'objectif est pertinent. Enfin, les bénéfices attendus de la réalisation de l'objectif sont brièvement exposés. Bien que distincts, les objectifs peuvent parfois se recouper compte tenu de la complexité et de l'ampleur du sujet. Étant donné le rôle transversal des décideurs gouvernementaux dans la mise en place de politiques et d'un environnement favorable, les 10 objectifs et principes directeurs sont tous pertinents pour ce groupe.

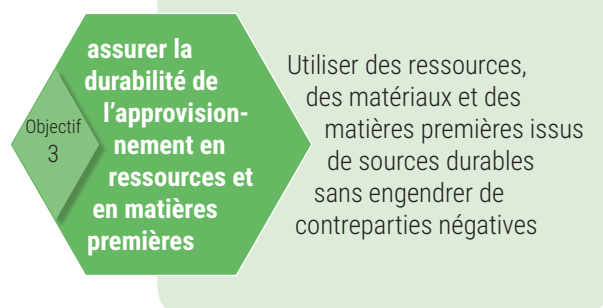


Le premier objectif concerne directement les chimistes, les ingénieurs chimistes, ainsi que les concepteurs de matériaux et de produits qui s'investissent dans l'innovation chimique et en génie chimique. Il encourage la conception et l'utilisation de molécules chimiques (ou de groupes de molécules) de dangerosité (c'est-à-dire toxicité, persistance, mobilité, etc.) minimale (ou nulle) pour l'être humain et l'environnement. L'« élimination des dangers par une conception raisonnée » contribue à la mise au point de matériaux, produits et procédés de production plus sûrs et plus durables, favorise la réutilisation et le recyclage, et permet de s'attaquer d'emblée aux difficultés rencontrées en aval. Cette approche permet de répondre à la demande croissante des consommateurs, de renforcer la compétitivité et de se conformer aux cadres réglementaires applicables, entre autres, à la réutilisation, au recyclage et à l'élimination sans risques. Lors de la détermination des dangers chimiques, il convient d'utiliser autant que faire se peut des méthodes d'expérimentation non animales.

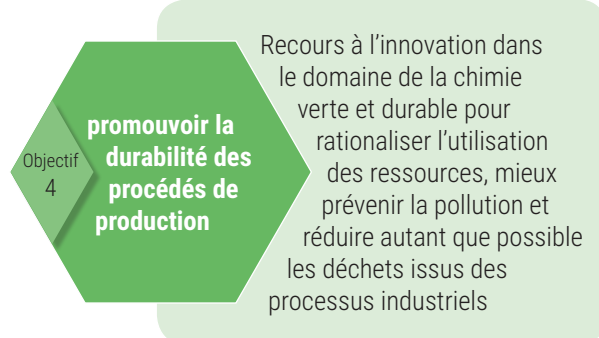


Le deuxième objectif concerne les concepteurs de matériaux et de produits, ainsi que les chimistes. Il encourage l'innovation dans le domaine de la chimie, des matériaux et/ou des produits, qui permettent de mettre au point et d'appliquer des solutions de substitution aux produits chimiques (ou groupes de produits chimiques) suscitant actuellement des préoccupations aux plans de la santé humaine et de l'environnement. L'objectif poursuivi est de concevoir et d'introduire des solutions de substitution qui n'ont pas de conséquences néfastes, et ne compromettent pas d'autres objectifs de développement (par ex. l'atténuation des effets des changements climatiques). Dans le cas contraire, ces solutions risqueraient de donner lieu à des substitutions regrettables. Les produits et procédés de substitution peuvent assurer les fonctions recherchées en recourant à des méthodes non chimiques. Afin de faciliter la réalisation de cet objectif, il convient de faire intervenir des équipes pluridisciplinaires, constituées de fabricants, de responsables des réglementations

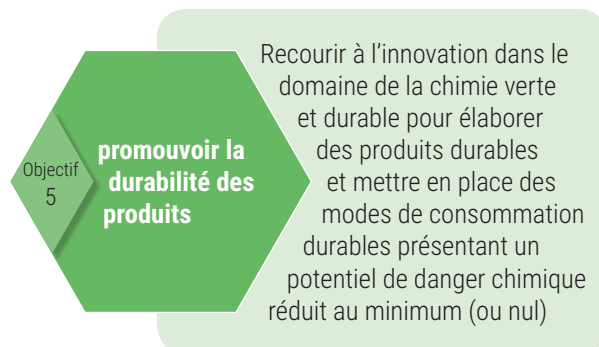
et de spécialistes de la santé et de la sécurité, et de procéder à des évaluations des produits et procédés de substitution afin de déterminer les contreparties potentielles.



Le troisième objectif est pertinent pour les parties prenantes des secteurs de l'extraction minière, de la transformation et de l'agriculture, ainsi que pour les chimistes, les ingénieurs, notamment dans l'industrie chimique, et les responsables de chaîne d'approvisionnement. Il encourage à utiliser des ressources, des matériaux et des matières premières durables et renouvelables dans le secteur de la chimie, y compris des matières premières chimiques recyclées, ainsi que des matières premières biosourcées, lorsque cela permet de répondre à des critères de durabilité plus larges. Il vise également à promouvoir l'utilisation durable des ressources rares, comme certains métaux. S'agissant des matières premières biosourcées, la reconnaissance de la nécessité de disposer de terres agricoles pour produire de la nourriture et la limitation des effets destructeurs de la consommation de matières premières sur les forêts et les écosystèmes sont au nombre des critères de durabilité à prendre en compte.

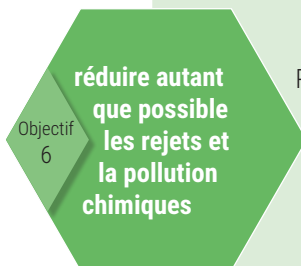


Le quatrième objectif est pertinent pour les chimistes, les ingénieurs chimistes et industriels, ainsi que les spécialistes de la gestion des déchets qui prennent part à la mise au point de solutions chimiques et de génie chimique à même d'améliorer les procédés de production industriels et de favoriser la prévention de la pollution, ainsi que la réutilisation et le recyclage des matériaux. Il encourage l'innovation chimique visant à renforcer l'utilisation rationnelle des ressources, à réduire autant que possible les déchets industriels et à favoriser la réutilisation et le recyclage des produits chimiques et des matériaux pendant les processus de production. La gestion durable des ressources et la production propre sont des moyens d'agir en ce sens.



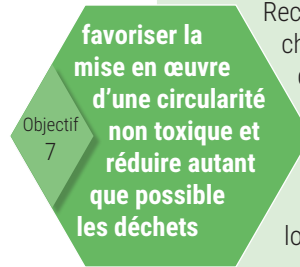
Le cinquième objectif est pertinent pour les responsables de marques, les concepteurs de produits et de matériaux, les chimistes et les ingénieurs chimistes qui prennent part à la conception et à l'élaboration des produits. Il encourage les innovations chimiques visant à concevoir et à élaborer des produits durables, non toxiques et sûrs, ayant une longue durée de vie (c'est-à-dire durée de conservation et de vie utile, réparabilité) et pouvant être réutilisés ou recyclés dans le cadre d'une économie circulaire.

Il s'agit d'un aspect important de la promotion de la consommation durable.



Réduire les rejets chimiques d'un bout à l'autre du cycle de vie des substances chimiques et des produits

Le sixième objectif est pertinent pour les responsables de production, les ingénieurs chimistes et les chimistes impliqués dans les procédés industriels et la mise au point des produits, ainsi que pour les autres parties prenantes tout au long du cycle de vie des produits, y compris le secteur des déchets. Il encourage les innovations chimiques visant à réduire autant que possible les rejets intentionnels et non intentionnels de substances chimiques dans les environnements intérieurs et extérieurs lors de la fabrication, de l'utilisation et de l'élimination des produits. Pour y parvenir, il est par exemple possible de définir de nouvelles conceptions permettant de réduire à un minimum ou d'éliminer les substances chimiques dangereuses présentes dans les produits ; de favoriser au maximum le recours à des systèmes de production en circuit fermé ; de prendre des mesures permettant de garantir la réutilisation et le recyclage des matériaux ; de réaliser des analyses du cycle de vie ; et de veiller à la transparence de l'information. Pour atteindre un tel objectif, il est impératif d'assurer la communication entre tous les acteurs de la chaîne de valeur.



Recourir à des innovations chimiques qui permettent d'évoluer vers des flux circulaires non toxiques de matériaux et des chaînes d'approvisionnement et de valeur durables tout au long du cycle de vie

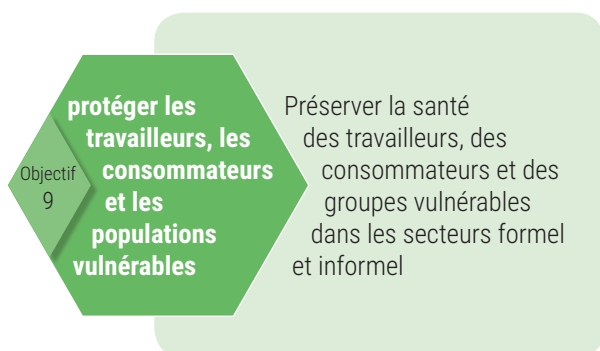
Le septième objectif est pertinent pour toutes les parties prenantes. Sont concernés ici les citoyens, les consommateurs, les décideurs, les investisseurs, ainsi que les scientifiques et les innovateurs qui se préoccupent et se soucient de la mise au point des produits et des procédés industriels. Cet objectif encourage les innovations dans le domaine de la chimie verte et durable qui visent à promouvoir une gestion durable des matériaux, en permettant notamment de conserver la valeur des matériaux pendant le cycle de vie d'un produit. Il porte sur bien plus que la réduction au minimum des rejets dans l'environnement puisqu'il encourage aussi l'arrêt de l'incorporation de composés toxiques dans les produits afin de pouvoir réutiliser et recycler ces derniers, et de réduire ainsi les déchets.



Tenir compte des considérations sociales et de normes élevées de déontologie, d'éducation et de justice pour promouvoir l'innovation chimique

Le huitième objectif est pertinent pour toutes les parties prenantes, notamment les citoyens, les consommateurs, les décideurs, les gestionnaires et les scientifiques qui sont impliqués dans la gestion rationnelle des produits chimiques et des déchets. Il tient compte des avantages qu'offrent les produits et procédés chimiques, tout en soulignant que ces avantages ne sont souvent pas répartis équitablement. Il encourage à aligner pleinement l'innovation chimique sur les objectifs plus larges de durabilité sociale, ce qui couvre, sans s'y limiter, la déontologie, l'éducation

et la justice socioéconomique. Parmi les lignes d'action spécifiques à prendre en considération, on peut citer, sans s'y limiter, les suivantes : protéger les travailleurs et les communautés défavorisées ; rendre les produits issus de la chimie durable accessibles à tous ; revendiquer un soutien financier et technique afin que chaque pays et chaque entrepreneur puisse atteindre ses objectifs ; promouvoir une éducation qui lutte contre les effets disproportionnés ; et veiller à ce que chacun puisse jouir des avantages qu'offre la chimie durable.



Le neuvième objectif est pertinent pour toutes les parties prenantes, notamment les citoyens, les consommateurs, les travailleurs, les décideurs, les gestionnaires et les scientifiques qui sont impliqués dans la gestion rationnelle des produits chimiques et des déchets. Il souligne que le passage à une chimie verte et durable doit aller de pair avec l'adoption de mesures de gestion et de protection plus larges visant à assurer la gestion rationnelle des produits chimiques et des déchets, à l'exemple de l'application du Système général harmonisé de classification et d'étiquetage des produits chimiques (SGH). Il tient compte du fait que les travailleurs, les communautés marginalisées et les consommateurs sont parmi les plus touchés par la pollution de l'environnement et devraient être expressément pris en compte dans la mise en œuvre des priorités de la chimie verte et durable et des solutions s'y rapportant (Alcántar *et al.*, 2017). Il encourage également l'accès au savoir et à l'éducation, ainsi que la participation (citoyens, consommateurs, secteurs public et privé) en vue de protéger la santé humaine et l'environnement contre les produits chimiques dangereux.



Le dixième objectif est pertinent pour tous les dirigeants et scientifiques engagés dans un dialogue social élargi sur le rôle de l'industrie chimique dans la réponse aux besoins sociétaux en parallèle au renforcement et à la promotion du développement durable. Il encourage à se mobiliser, à établir des priorités et à convaincre pour que l'innovation chimique puisse se tourner vers la mise au point de solutions permettant de relever les défis de la durabilité, dont, entre autres, la sécurité alimentaire, le bien-être humain, les changements climatiques, la biodiversité, la pollution et la résilience de la chaîne d'approvisionnement (aux niveaux local et mondial). Il encourage également à prendre en compte des facteurs plus larges, tels que l'impact du développement logiciel sur l'augmentation des déchets électriques, ou les incidences sur le plan de la durabilité des cycles d'innovation courts dans l'industrie textile (mode éphémère).

Facteurs déterminants de l'efficacité de la mise en œuvre

La mise en œuvre des 10 objectifs et principes directeurs qui sous-tendent la chimie verte et durable passe par des changements radicaux en matière de sensibilisation, de connaissances et de pratiques d'innovation. Le chapitre 4 ci-après présente les domaines et sujets touchant à la technologie et à l'innovation qui sont jugés

particulièrement importants pour progresser sur la voie de la chimie verte et durable. Les chapitres 5, 6 et 7 présentent les outils, mesures et indicateurs indispensables à cet effet, et le chapitre 8 préconise une action renforcée de la part de toutes les parties prenantes. L'important thème transversal de l'éducation et de l'apprentissage dans une optique de promotion de la chimie verte et durable fait l'objet d'un manuel spécialisé qui sera publié en 2021.



INNOVATION CHIMIQUE ET TECHNOLOGIQUE EN FAVEUR DE LA CHIMIE VERTE ET DURABLE >

4.1	Éléments d'un cadre pour la recherche et l'innovation dans le domaine de la chimie verte et durable	40
4.2	Matières premières chimiques biosourcées et renouvelables	41
4.3	Perspectives en matière d'innovation chimique	44
4.4	Perspectives d'innovation en matière de procédés	51
4.5	Perspectives de la numérisation dans une optique de promotion de la chimie verte et durable	55
4.6	Potentiel de l'innovation en matière de chimie verte et durable dans un secteur donné : exemple de l'énergie	56

4.1 Éléments d'un cadre pour la recherche et l'innovation dans le domaine de la chimie verte et durable

Un nombre croissant de revues et de conférences scientifiques internationales s'articulent autour de thèmes de recherche et d'initiatives en matière d'innovation s'inscrivant dans le cadre de la chimie verte et durable. Si le travail accompli couvre une grande variété de thématiques, aucun cadre mondial ne structure les sujets de recherche et d'innovation dans le domaine de la chimie verte et durable. Le présent chapitre entend apporter une contribution sur ce point en passant en revue les thématiques chimiques et technologiques qui sont considérées comme essentielles pour promouvoir l'innovation en matière de chimie verte et durable. Il vise ainsi à orienter l'élaboration d'un programme international de recherche sur la chimie verte et durable.

Les thématiques abordées dans le présent chapitre ont été déterminées à l'issue d'un examen de publications sur la chimie verte et durable (par ex. Bazzanella, Friege et Zeschmar-Lahl, 2017 ; Zimmerman *et al.*, 2020) ainsi que d'ordres du jour de conférences portant sur des questions relatives à la chimie verte et durable. Pour ce dernier aspect, on peut citer, à titre d'exemple, la série de conférences sur la chimie et l'ingénierie vertes organisées par l'American Chemical Society (ACS, 2020b), ou la conférence sur la chimie verte et durable organisée chaque année par la Fondation Elsevier (Elsevier, 2020a). Les thématiques abordées vont de la mise au point de molécules plus inoffensives que celles entrant actuellement dans la composition de certains produits chimiques (ou groupes de produits chimiques suscitant des préoccupations) au recours à des innovations chimiques pour rationaliser l'utilisation des ressources dans les procédés de production. Plusieurs des thématiques et produits chimiques préoccupants considérés sont couverts par des conventions internationales, telles que la Convention de Stockholm ou la Convention de Bâle. Le présent chapitre met également en avant le secteur de l'énergie qu'il cite comme l'un des (nombreux) exemples de la contribution que peut apporter l'innovation dans le domaine de la chimie verte et durable au développement durable au niveau sectoriel.

Les thématiques et les exemples présentés n'ont pas été évalués sous l'angle de la durabilité. Afin de déterminer s'ils sont « plus verts » et/ou « plus durables » que les pratiques actuelles, une analyse du cycle de vie et une évaluation sociale peuvent être nécessaires pour clarifier les hypothèses, obtenir des estimations des émissions et évaluer les incidences. En outre, il peut être utile de procéder à des évaluations qualitatives pour repérer les éventuelles contreparties. Par exemple, un plastique biodégradable ne va pas nécessairement dans le sens de la durabilité, à moins que les conditions aient été mises en place pour garantir une dégradation complète de celui-ci (par ex. dans une usine de compostage industriel). L'absence de contreparties ou d'incidences est, en tout état de cause, un objectif difficile à atteindre qui a peu de chances de se réaliser. Le chapitre 5 et le rapport GCO-II fournissent de plus amples informations sur l'analyse du cycle de vie.

4.2 Matières premières chimiques biosourcées et renouvelables

Biobased feedstocks

Matières premières biosourcées

Depuis plus d'un siècle, l'industrie chimique utilise des ressources fossiles (pétrole, charbon et gaz, essentiellement) pour produire des substances chimiques de base comme l'ammoniac, le méthanol, l'éthylène et le propylène. Ces substances

chimiques servent de base à toute une série d'autres substances, matériaux et produits rattachés à la chaîne de valeur de l'industrie chimique. Compte tenu de l'épuisement (et, par conséquent, de la raréfaction) des ressources fossiles, de leur contribution aux émissions de gaz à effet de serre et des incertitudes qui pèsent sur les chaînes d'approvisionnement mondiales, la possibilité d'utiliser de nouvelles sources biologiques pour produire des matières premières chimiques est à

Encadré 4.1: Biomass and bio-based feedstocks are not necessarily more sustainable

L'utilisation de biomasse et de matières premières renouvelables biosourcées dans l'industrie chimique ouvre des perspectives intéressantes, mais soulève par ailleurs d'importantes questions et inquiétudes concernant la durabilité. Un élément important à prendre en considération est l'approvisionnement en biomasse. Par exemple, l'utilisation de biomasse issue du défrichage des forêts pour laisser place à des plantations et/ou de biomasse provenant de terres occupées peut entraîner la destruction d'habitats, l'émission de gaz à effet de serre et l'érosion de terres arables, phénomènes qui ont tous des effets néfastes sur les populations locales. De même, l'utilisation de pesticides et d'engrais pour la production de biomasse dans le cadre de l'agriculture industrielle peut avoir des effets néfastes sur la santé humaine et l'environnement.

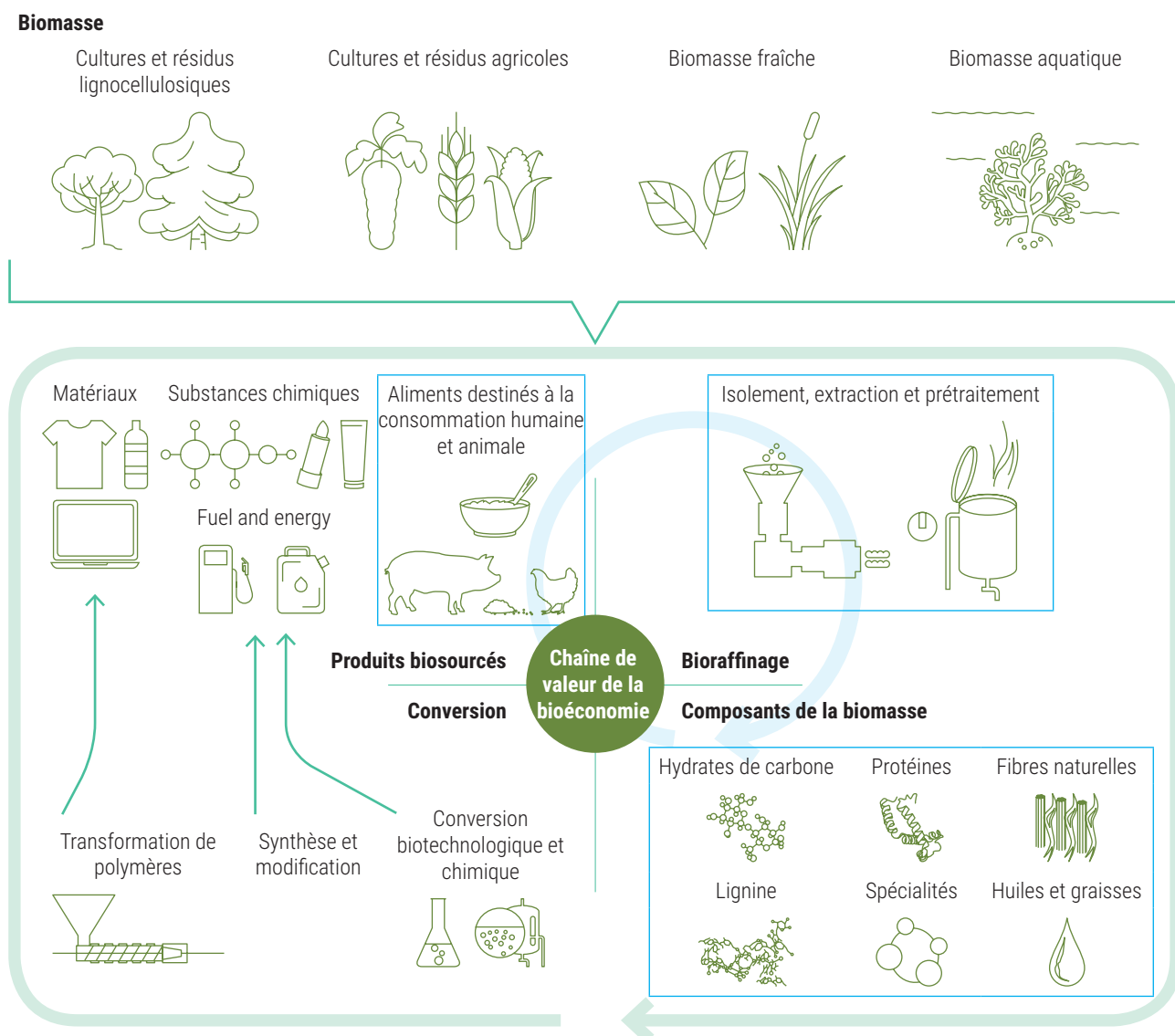
Il est donc primordial de s'approvisionner en biomasse et en matières premières de manière durable. La biomasse issue de microalgues peut, par exemple, pousser sur des terres non arables, ce qui contribue à enrayer la désertification et permet de convertir le CO₂ en matières premières grâce au phénomène de photosynthèse (Karan *et al.*, 2019). L'utilisation de biomasse issue de déchets agricoles plutôt que de cultures, peut, sous certaines conditions, renforcer l'efficacité avec laquelle les ressources sont employées et faire progresser la circularité.

Un deuxième élément à prendre en considération est la nature des substances, matériaux et produits chimiques fabriqués à partir de la biomasse. Si le bioraffinage permet de réduire les besoins en énergie, les besoins en ressources fossiles et les émissions de certaines substances chimiques dangereuses, les substances chimiques produites (par ex. l'ammoniac) peuvent être les mêmes que celles obtenues par des procédés pétrochimiques. Ces substances chimiques présentent alors le même potentiel de danger et les produits pour lesquels elles sont utilisées comme produits intermédiaires sont tout aussi dangereux.

Dans le cas des bioplastiques, par exemple, une étude récente a établi que la plupart des bioplastiques et des matériaux d'origine végétale contenaient des substances chimiques toxiques, et que les matériaux biosourcés/biodégradables sont tout aussi toxiques que les plastiques traditionnels (Zimmermann *et al.*, 2020). C'est par exemple le cas du PVC formulé à partir de matières premières biosourcées, qui ne résout pas les problèmes potentiels de formation de dioxines lors de son élimination non écologiquement rationnelle.

En résumé, le remplacement des matières premières fossiles par des matières premières issues de sources renouvelables ne permet pas nécessairement de progresser sur la voie de la durabilité. Il est donc important d'examiner les avantages et les inconvénients inhérents à l'utilisation des différentes sources de matières premières et des divers procédés chimiques. Les approches axées sur le cycle de vie peuvent fournir des éléments de réflexion utiles dans le cadre de telles évaluations.

Figure 4.1: **Chaîne de valeur biosourcée** (Université de Wageningen [WUR], n.d.)



l'étude. Cette démarche est conforme au septième principe de la chimie verte qui pose comme postulat que lorsque la technologie et les moyens financiers le permettent, les matières premières utilisées doivent être renouvelables plutôt que non renouvelables (Anastas et Warner, 1998).

La biomasse est dérivée des organismes vivants, généralement des plantes. Les technologies de bioraffinage peuvent permettre de produire toute une série de substances chimiques de base traditionnellement obtenues par des technologies de raffinage pétrochimique à la fois polluantes et gourmandes en énergie (Kohli, Prajapati et Sharma, 2019). Les biocarburants et divers

constituants chimiques, tels que le bioéthylène et le biopropylène (en remplacement de l'éthylène et du propylène d'origine fossile) ou les polymères biodégradables en sont des exemples. La biomasse peut donc constituer la base de toute une série de produits et d'applications, notamment dans les domaines de l'alimentation, de l'énergie, des matériaux et des produits pharmaceutiques.

Le dioxyde de carbone comme ressource et matière première

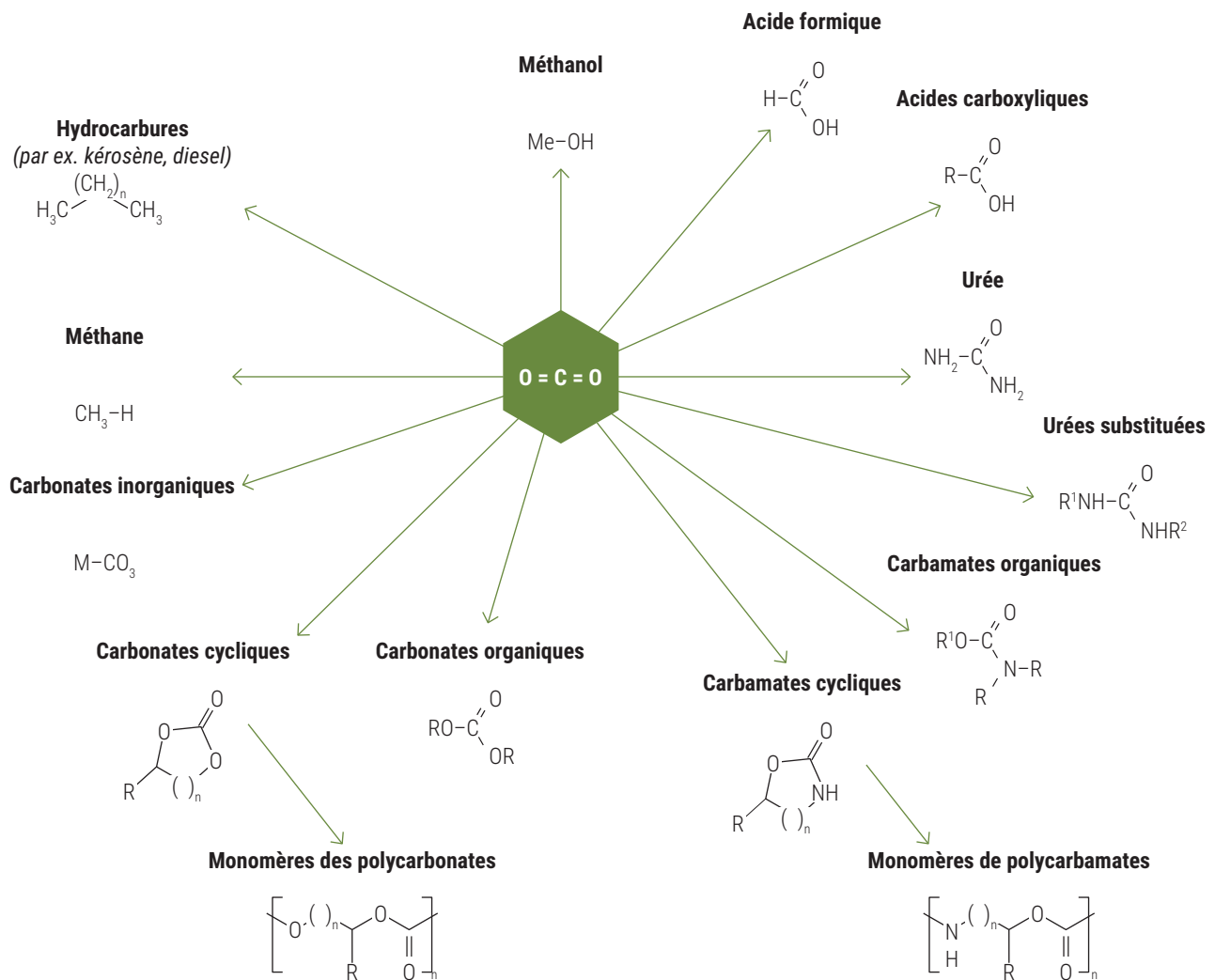
Plusieurs voies chimiques permettent d'utiliser le CO₂, un puissant gaz à effet de serre, comme

ressource. Parmi celles-ci, on peut citer la conversion en carburant, l'utilisation comme matière première pour l'industrie chimique et les utilisations sans conversion préalable (Agence internationale de l'énergie [AIE], 2019). Ces technologies permettent potentiellement de soustraire du CO₂ à l'atmosphère, et peuvent donc contribuer à atténuer les effets des changements climatiques. Leur coût énergétique étant toutefois très élevé, il est indispensable d'utiliser des énergies renouvelables pour répondre aux critères de durabilité. La Figure 4.2 donne une vue d'ensemble des possibilités d'utilisation du dioxyde de carbone comme ressource et matière première dans l'industrie chimique. Si certaines

des technologies en sont au stade de la recherche fondamentale, d'autres sont déjà parvenues à maturité, mais leur percée commerciale n'a pas encore eu lieu.

En tant que ressource pour la production de carburant, le CO₂ peut être converti en d'autres molécules à fort contenu énergétique grâce à des procédés chimiques et électrochimiques. Parmi les gaz obtenus, on peut citer le syngas, l'acide formique, le méthane, l'éthylène, le méthanol ou le diméthyléther (DME). Le coût énergétique de ce type de conversion étant très élevé, l'utilisation d'énergies renouvelables dans ces procédés revêt une importance toute particulière.

Figure 4.2: **Vue d'ensemble des substances chimiques dérivées du dioxyde de carbone** (Styring et al., 2012, p. 11)



En tant que matière première chimique, le CO₂ peut remplacer toute une série de matières premières fossiles utilisées pour produire des substances chimiques de base entrant dans la composition de produits chimiques d'usage courant. Parmi ses autres utilisations comme matière première, on peut citer l'incorporation dans des époxydes pour la fabrication de polymères ou la conversion en minéraux inorganiques pour les matériaux de construction. Il est ainsi stocké dans le produit. Comme pour sa conversion en carburant, il est important d'utiliser des sources d'énergie renouvelables.

Les utilisations du CO₂ sans conversion préalable ne nécessitent aucune réaction chimique de

conversion en d'autres substances chimiques. On retiendra, entre autres exemples d'utilisation, l'injection à l'état supercritique (fluide) dans des puits de pétrole pour améliorer la récupération de l'huile, ou la récupération du méthane des filons de charbon vierges. Le CO₂ supercritique peut également être utilisé comme solvant dans la transformation de produits chimiques (par ex., l'extraction d'arômes) et fait actuellement l'objet d'études en vue de son utilisation comme fluide caloporteur dans le cadre de certaines applications géothermiques. Là encore, il est important de prendre en considération les besoins et incidences énergétiques découlant de l'utilisation à l'état supercritique (fluide).

4.3 Perspectives en matière d'innovation chimique

Plastiques

Les plastiques sont des polymères organiques qui couvrent une gamme étendue de matériaux synthétiques ou semi-synthétiques utilisés, entre autres, dans les vêtements, les voitures, les jouets, les téléviseurs, les ordinateurs, etc. Ce sont généralement des dérivés du pétrole brut, du charbon ou du gaz naturel. D'importantes quantités en sont rejetées dans l'environnement et s'accumulent dans les écosystèmes, y compris dans les systèmes d'eau douce et les océans. Ils contiennent en outre des additifs chimiques comme, par exemple, des plastifiants, dont certains suscitent des préoccupations (voir ci-dessous) et peuvent compromettre le recyclage.

Les bioplastiques sont des matières plastiques produites à partir de sources renouvelables aussi bien végétales qu'animales, notamment des céréales (par ex. blé, maïs, paille), d'autres plantes (coton, copeaux de bois, sciure, algues, etc.), et des déchets agricoles et alimentaires. Parmi les plastiques biosourcés produits actuellement, on peut citer ceux à base d'amidon, les polyhydroxyalcanoates (PHA), l'acide

polylactique (PLA) et les polymères à base de cellulose ou de protéines (Karan *et al.*, 2019). L'acide polylactique (PLA), par exemple, est un polyester thermoplastique aliphatique biodégradable, dérivé du sucre par un processus de fermentation, qui peut remplacer le polyéthylène dans diverses applications, notamment l'emballage.

Le terme « bioplastique » englobe à la fois des plastiques non biodégradables et des plastiques biodégradables, les deux catégories pouvant contribuer à faire progresser la durabilité, si certaines conditions sont remplies. Les bioplastiques non biodégradables peuvent, par exemple, être utilisés dans le cadre du développement d'infrastructures durables (par ex., canalisations d'égouts, bâtiments, matériaux de toiture, revêtements routiers, etc.) et servir de puits de carbone à long terme. Pour aller dans le sens de la durabilité, il est indispensable d'assurer un recyclage écologiquement rationnel des matériaux lorsqu'ils arrivent en fin de vie (ce qui n'est souvent pas le cas).

Les bioplastiques biodégradables sont parfois utilisés pour des produits à durée de conservation

courte ou moyenne, et leur durée de vie peut être ajustée en fonction de l'usage qui en est fait (Karan *et al.*, 2019). Toutefois, si l'ensemble des conditions spécifiques de biodégradation ne sont pas réunies

(par ex. usine de compostage), ils ne permettent pas non plus de progresser sur la voie de la durabilité. Par exemple, ceux qui se retrouvent dans le milieu marin ne se dégradent pas rapidement dans cet environnement. Cette question fait l'objet d'un examen approfondi dans la publication du PNUE intitulée « Biodegradable Plastics and Marine Litter. Misconceptions, Concerns and Impacts on Marine Environments » (Plastiques biodégradables et déchets marins : idées fausses, inquiétudes et incidences sur les milieux marins) (Kershaw, 2015).

Plastifiants

Les plastifiants sont des produits chimiques ajoutés au plastique pour assouplir les mélanges de polymères et améliorer leur aptitude au traitement. De nombreux plastifiants ne forment généralement pas de liaisons covalentes avec les polymères et peuvent donc être lessivés, ce qui peut entraîner une exposition humaine et contaminer l'environnement (Jamarani *et al.*, 2018). À titre d'exemple, on peut citer certains plastifiants à base d'esters de phtalates, qui ont la capacité de s'échapper des produits qui les contiennent lors de leur utilisation et sont considérés comme préoccupants en raison des effets sanitaires néfastes qu'ils peuvent entraîner (par ex., perturbation endocrinienne). Leur omniprésence dans l'environnement constitue une autre source de préoccupation (Benjamin *et al.*, 2017).

Les innovations visant à faire progresser la durabilité dans ce domaine sont notamment axées sur la conception de plastifiants à faible taux de migration, peu volatils, sans effets néfastes sur la santé et biodégradables. Les composés de dibenzoate d'alkyle-diol, par exemple, assurent une grande partie des fonctions du DEHP (phtalate de bis(2-éthylhexyle)), un plastifiant préoccupant. Selon Erythropel *et al.* (2018), ils se dégradent rapidement dans les sols et présentent un faible profil de toxicité.

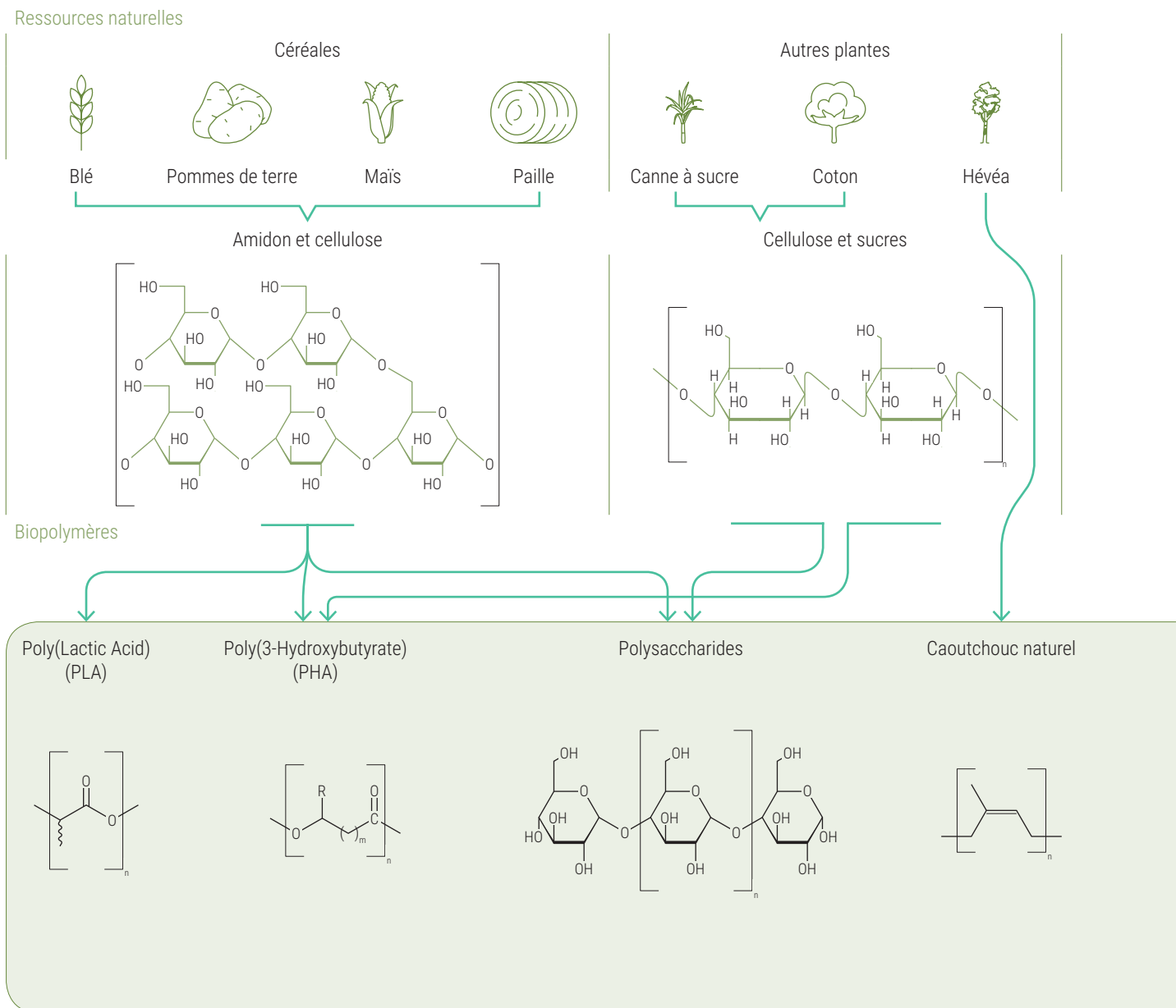
À l'instar d'autres molécules fonctionnelles, les plastifiants biosourcés peuvent être fabriqués à partir de ressources agricoles, dont des céréales, des oléagineux, des arbres, des fruits et des légumes ou leurs déchets. D'un point de vue chimique, ces ressources offrent des structures appropriées (polyol et polyester) ainsi que des fonctionnalités adaptées (molécules bi-, tri-, tétra- et penta-fonctionnelles) et présentent des poids moléculaires adéquats (monomère, oligomère et polymère) (Bocque *et al.*, 2015). Toutefois, malgré les possibilités offertes par les plastifiants biosourcés, il faut effectuer des recherches plus poussées pour étudier leur coût, leur disponibilité, leur toxicité et leurs effets (Harmon et Otter, 2017). Étant donné que « biosourcé » ne signifie pas nécessairement « non toxique », l'acquisition de connaissances plus complètes permettrait de mieux comprendre les perspectives en matière de durabilité et les contreparties éventuelles.

Solvants

Un solvant a pour fonction de dissoudre un soluté solide, liquide ou gazeux. Si l'eau est le solvant le plus connu, de nombreux solvants sont des composés organiques, parmi lesquels on peut citer les alcools et les glycols, le DMSO, l'éther (di)éthylique, l'hexane, le tétrachloroéthane, le toluène ou le xylène. Ils sont utilisés, par exemple, comme décapants, dans les procédés d'extraction, comme dégraissants ou comme additifs et diluants. De nombreux solvants organiques possédant des propriétés dangereuses sont rejetés dans l'environnement en quantités importantes. Selon la nature du solvant, les éventuels effets sur la santé peuvent se caractériser par une irritation de la peau, des yeux et des poumons, des maux de tête, des nausées, des vertiges et des étourdissements, tandis qu'une forte exposition peut entraîner une perte de conscience et même la mort (Health and Safety Executive, 2003).

Les efforts d'atténuation des effets des solvants se concentrent particulièrement sur la mise au point de solvants verts et plus durables (Freire et Coutinho, 2019 ; Sheldon, 2019). L'innovation se déploie par exemple autour des thématiques suivantes : mise au point de solvants non toxiques à partir de déchets biotiques ;

Figure 4.3: **Vue d'ensemble des biopolymères et de leur origine naturelle** (Bocqué *et al.*, 2015, p. 15)

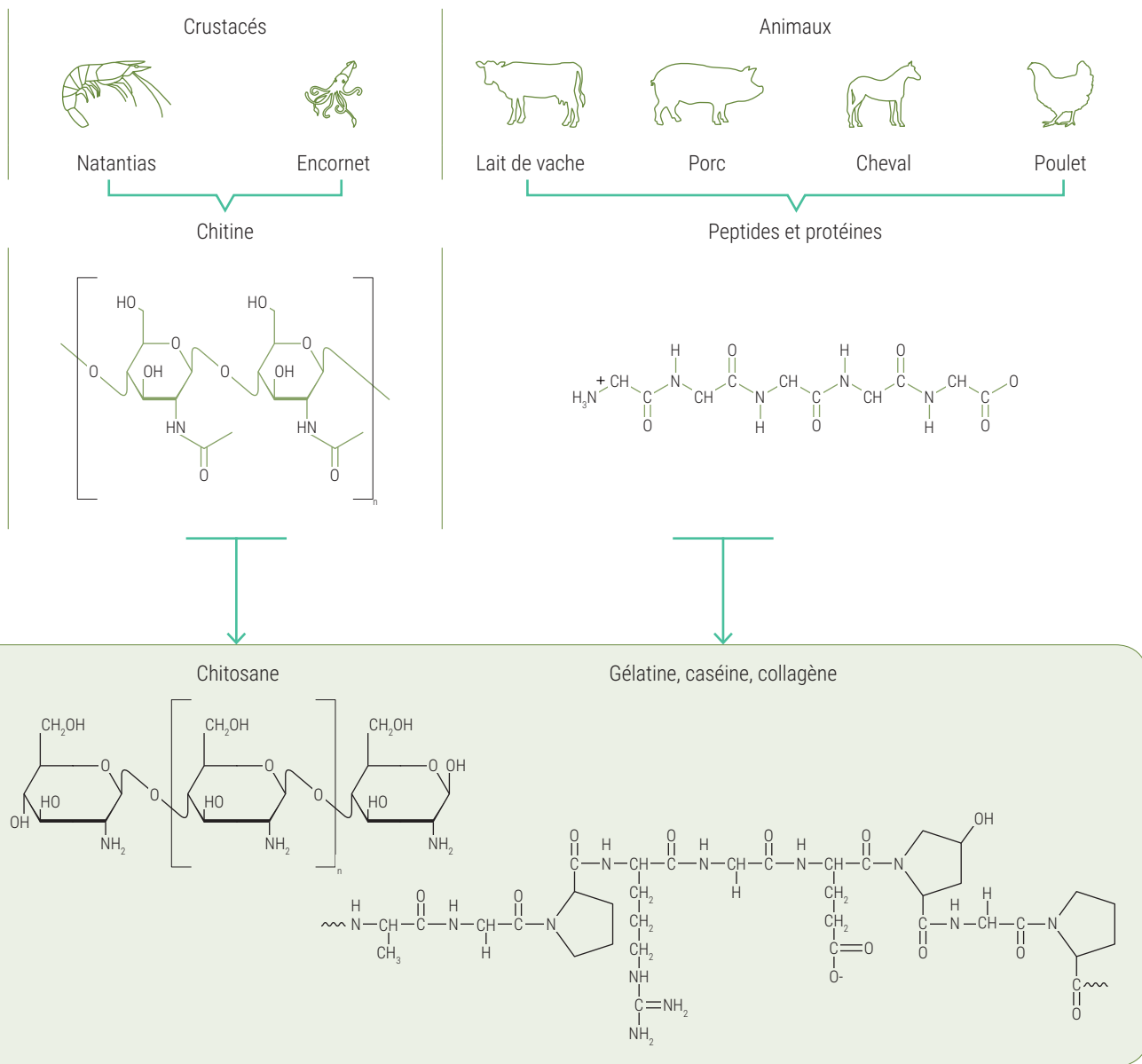


© 2015 Wiley Periodicals, Inc.

utilisation de l'eau comme solvant, en lieu et place des solvants organiques, dans le cadre de la production de produits pharmaceutiques et d'autres produits chimiques ; remplacement du toluène par des solutions plus sûres remplissant la même fonction ; ou conception de matériaux ne nécessitant pas l'utilisation de solvants (par ex., les nouveaux matériaux de construction qui ne requièrent ni peinture ni revêtement) (van der Waals *et al.*, 2018).

Agents hydrofuges, antigraisse et antisalissure

Les agents hydrofuges, antigraisse et antisalissure sont des substances chimiques qui, appliquées comme revêtements sur une surface, accroissent la résistance de celle-ci à la rétention ou à la pénétration d'eau, d'huile ou de saletés. La plupart de ces traitements reposent sur des produits chimiques fluorés. Des substances perfluoroalkylées et polyfluoroalkylées (PFAS)

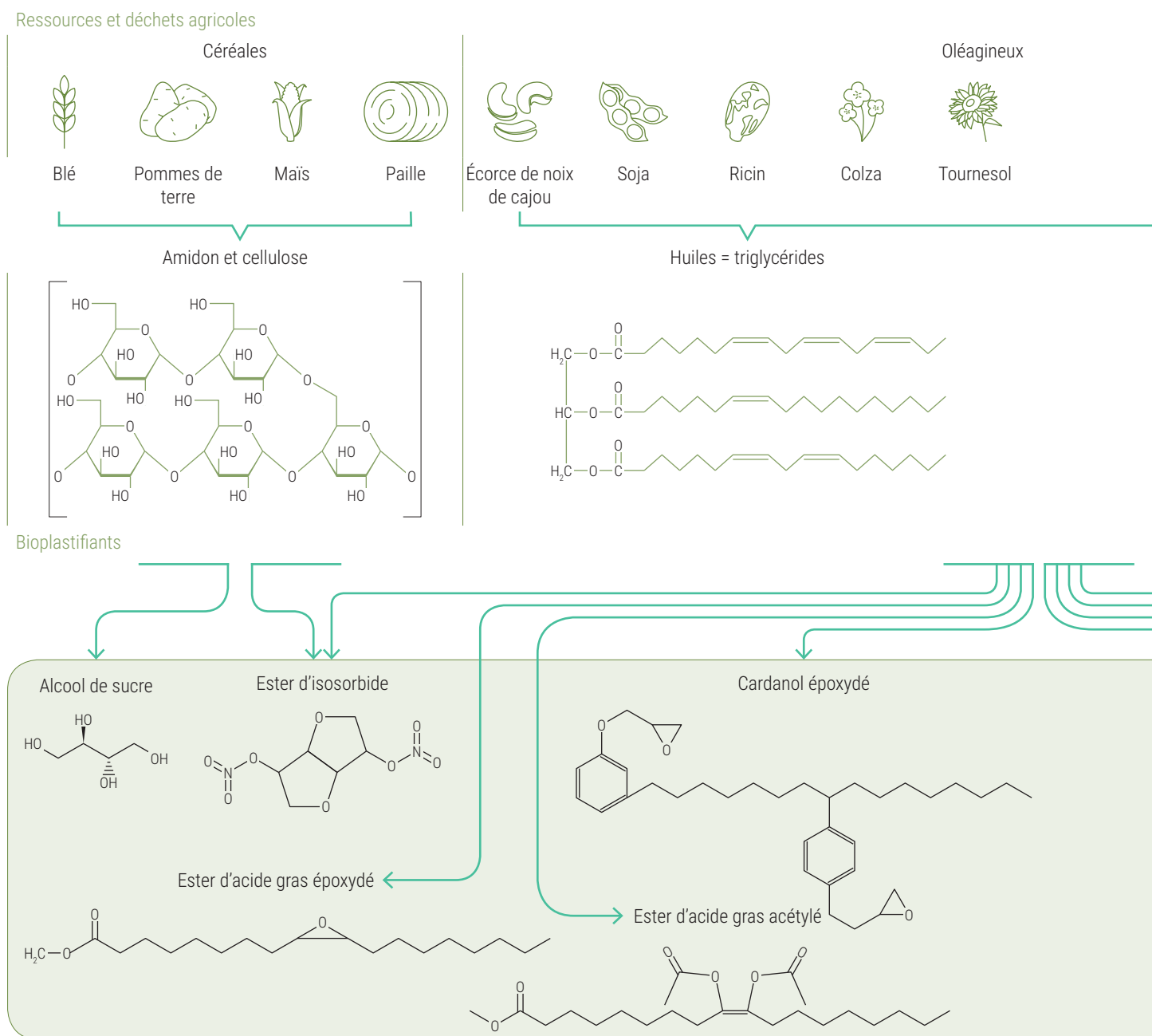


sont couramment utilisées dans diverses applications en raison de leur aptitude à repousser l'eau, la graisse et la saleté, et de leur résistance à la température. Bon nombre de PFAS sont des substances dangereuses pour la santé humaine, persistantes dans l'environnement, et les versions à chaîne longue se bioaccumulent dans les organismes vivants. Les PFAS à chaîne courte sont mobiles dans l'environnement et persistantes (PNUE, 2019b). Ces propriétés suscitent des préoccupations, ce qui ouvre des perspectives

d'innovation dans le domaine de la chimie verte et durable.

Toute une palette d'innovations ont été mises au point pour faire progresser la durabilité des agents hydrofuges, antigraisse et antisalissure. La chromatogénie, par exemple, est un procédé de chimie verte sans solvant qui confère aux papiers et aux cartons des propriétés hydrophobes grâce à l'action de chlorures d'acides gras appliqués en phase liquide sur le matériau. Les applications

Figure 4.4: **Vue d'ensemble de certains biopolymères et de leur origine naturelle** (Bocqué *et al.*, 2015, p. 21)

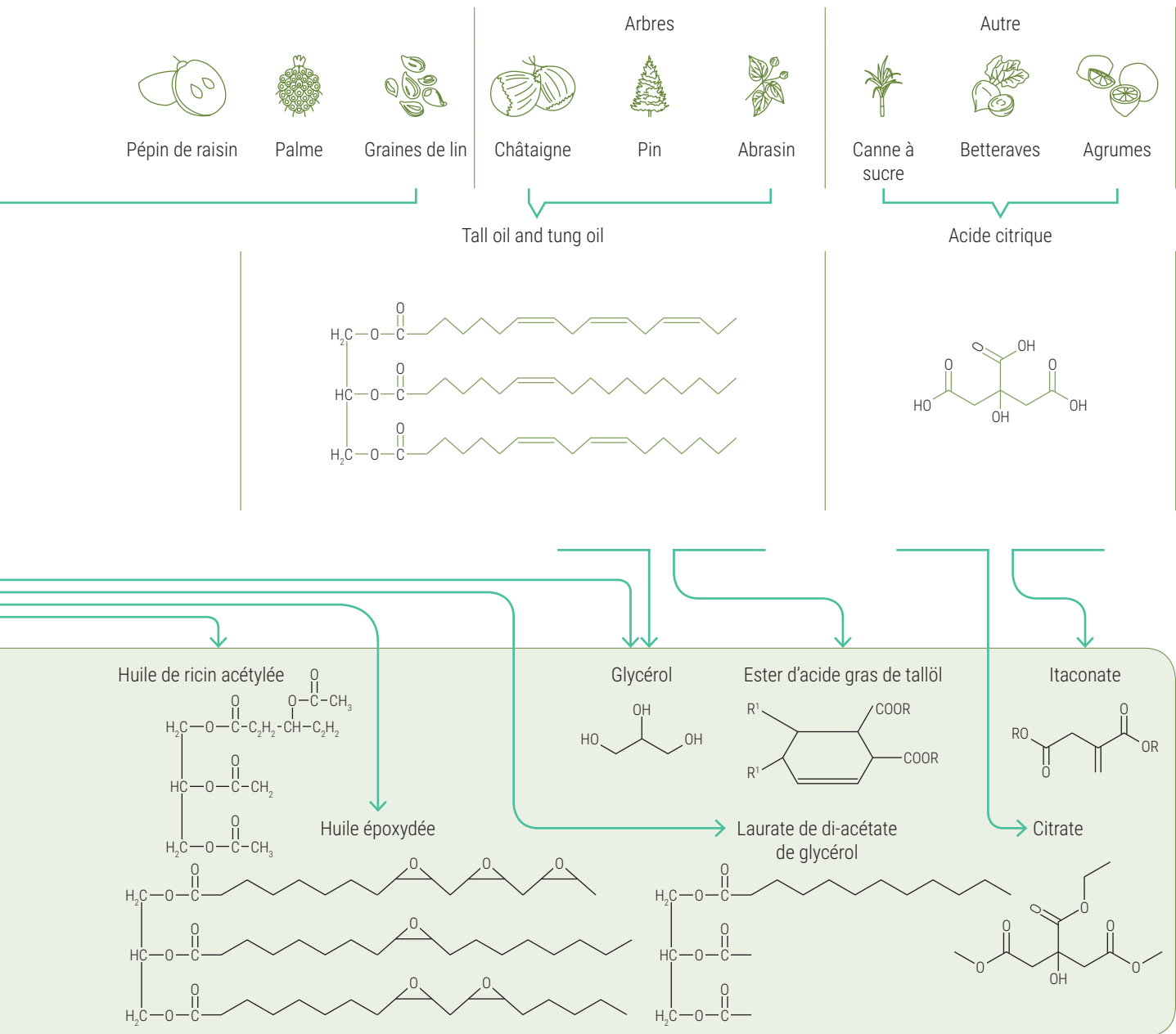


© 2015 Wiley Periodicals, Inc.

possibles sont notamment les emballages, les textiles, les appareils médicaux ou les films techniques. Dans l'industrie textile, les initiatives en matière d'innovation sont axées sur la mise au point d'agents hydrofuges durables pour les tissus, à base de biocarbone et sans PFC (Innovation for Sustainable Development Network [inno4sd.net], 2019).

Retardateurs de flamme

Le terme « retardateur de flamme » englobe un groupe diversifié de produits chimiques qui sont ajoutés aux matériaux manufacturés, tels que les plastiques et les textiles, les finitions de surface et les revêtements, pour les rendre résistants au feu. Un certain nombre de retardateurs de flamme



halogénés, à savoir les retardateurs de flamme bromés et chlorés, suscitent des préoccupations en raison de leur persistance, de leur potentiel de bioaccumulation, de leur capacité de propagation à longue distance et de leur toxicité, d'où le recours accru à des produits de substitution non halogénés, tels que les composés organophosphorés, même si certains de ces produits peuvent présenter des risques similaires.

Les retardateurs de flamme fabriqués à partir de sources biologiques présentent un intérêt considérable. Ils sont généralement peu coûteux, ne sont pas nécessairement toxiques et ne sont pas tributaires des fluctuations du marché pétrochimique (Howell *et al.*, 2018a). Les retardateurs de flamme biosourcés sont dérivés, par exemple, de l'acide tartrique (un sous-produit de l'industrie du vin), du chitosane

(un sous-produit de l'industrie de la pêche), de l'huile de ricin (une huile végétale non comestible) et de l'isosorbide (un diétherdiol produit à partir d'amidon) (Howell, Daniel et Ostrander, 2018). Une innovation récente consiste à produire des retardateurs de flamme en utilisant les deux substances suivantes : l'acide gallique, que l'on trouve couramment dans les fruits, les noix et les feuilles ; et l'acide 3,5-dihydroxybenzoïque présent dans le sarrasin. Les groupes hydroxyle de ces composés sont convertis en esters phosphoreux ignifugeants, que l'on peut ensuite ajouter à la résine époxy, un polymère utilisé dans les secteurs de l'électronique, de l'automobile et de l'aéronautique (Howell, Oberdorfer et Ostrander, 2018). La mise au point de nouveaux systèmes ignifuges biosourcés à partir de l'acide tannique constitue un autre champ d'innovation prometteur (Laoutid *et al.*, 2018).

Tensioactifs

Les tensioactifs ou agents de surface sont des produits chimiques qui sont ajoutés à un liquide pour réduire sa tension superficielle et augmenter ainsi ses propriétés d'étalement et de mouillage. Ces molécules organiques amphiphiles s'adsorbent à l'interface et s'auto-agrègent ou s'auto-assemblent en solution aqueuse ou non aqueuse en formant différentes phases. Les tensioactifs sont par exemple des composants clefs des détergents ménagers (par ex. lessive) et des produits d'entretien ménager

(par ex. nettoyant pour sols), ou des produits de toilette (par ex. shampoing). Ils peuvent irriter les yeux, la peau et les poumons, et certains sont des perturbateurs endocriniens connus ou suspectés, sont toxiques dans le milieu aquatique et peuvent se bioaccumuler (van der Waals *et al.*).

Les innovations chimiques visant à faire progresser la durabilité des tensioactifs sont désignées sous les noms de « tensioactifs verts », « tensioactifs d'origine oléochimique », « tensioactifs renouvelables », « biotensioactifs » ou « tensioactifs naturels » (Bhadani *et al.*, 2020). L'éventail des tensioactifs verts de substitution disponibles sur le marché est très varié et comprend, par exemple, des alkylpolyglucosides, des saponines d'origine

végétale, des dérivés d'acides aminés et des bêtaïnes (SpecialChem 2015). Dans bien des cas, les molécules tensioactives plus écocompatibles sont dérivées de constituants de la biomasse renouvelables (Bhadani *et al.*, 2020). La bêtaïne algale tensioactive, par exemple, est fabriquée grâce à un procédé de fermentation contrôlée utilisant des microalgues renouvelables (Business Wire, 2015). Elle entre dans la composition de produits qui nécessitent une mousse tels que les shampoings, les savons liquides, les liquides vaisselle à la main.

D'autres perspectives d'innovation concernent la modification des technologies et des méthodes d'amélioration des souches microbiennes (Kandasamy *et al.*, 2019). Par exemple, un nouveau tensioactif mis au point récemment grâce à des méthodes biotechnologiques est constitué de sophorolipides. Il présente de bonnes propriétés nettoyantes, est doux pour la peau et se dégrade rapidement dans l'environnement (Bhadani *et al.*, 2020).

Conservateurs chimiques

Les conservateurs chimiques sont des substances chimiques ajoutées aux produits pour empêcher leur décomposition par croissance microbienne ou par des changements chimiques indésirables. Ils sont très utilisés dans les produits alimentaires, les boissons, les médicaments, les peintures, les cosmétiques, le bois, etc. Selon leur composition chimique, les conservateurs peuvent avoir des effets néfastes sur la santé humaine et l'environnement. Par exemple, des effets endocriniens et des propriétés œstrogéniques ont été mis en évidence pour certains parabènes, à savoir le butylparabène et le propylparabène (CE, 2011). Le formaldéhyde et les conservateurs libérant du formaldéhyde utilisés dans les shampoings et les savons liquides pour bébés sont préoccupants en raison de leurs propriétés cancérigènes et allergènes (van der Waals *et al.*, 2018).

De nombreux conservateurs chimiques entrant en contact direct avec le corps humain, la mise au point de conservateurs chimiques plus sûrs est un des objectifs importants en matière d'innovation chimique. Les conservateurs chimiques inhibent

Encadré 4.2: Chimie verte et durable dans l'agriculture (Peabody O'brien, Franjevic et Jones, 2009)

La croissance démographique et l'augmentation de la demande de denrées alimentaires ont conduit à un recours accru aux pesticides et aux engrais dans le monde entier. Les pesticides extrêmement dangereux suscitent tout particulièrement des préoccupations pour la santé humaine et l'environnement. De même, le ruissellement des engrais pose d'importants problèmes environnementaux, notamment dans les écosystèmes d'eau douce et les écosystèmes marins (PNUE, 2019b). La chimie verte et durable a donc un rôle important à jouer dans la promotion de la durabilité de l'agriculture.

Selon Peabody O'brien, Franjevic et Jones (2009), la chimie verte et l'agriculture durable sont interdépendantes d'au moins trois manières. Premièrement, la chimie verte et durable est consommatrice d'intrants agricoles, tels que les matières premières biologiques. Pour que les matières premières biosourcées dont ils ont besoin soient véritablement « vertes », les chimistes verts doivent donc s'assurer que les agriculteurs pratiquent une agriculture durable. Deuxièmement, les solutions de substitution qu'offre la chimie verte peuvent jouer un rôle important dans la production de biens agricoles sans pesticides toxiques ni autres produits chimiques préoccupants. Enfin, les innovations dans le domaine de la chimie verte peuvent contribuer à réhabiliter les terres, en éliminant la pollution chimique des sols découlant des pratiques agricoles traditionnelles.

intrinsèquement la croissance microbienne, mais il est difficile d'en trouver un qui ne présente aucune toxicité. Les efforts se concentrent sur l'identification et la mise au point de conservateurs chimiques moins toxiques que ceux que l'on trouve actuellement sur le marché.

Une étude récente s'inscrivant dans une optique de chimie verte compare les conservateurs chimiques pour différentes catégories de produits (Buckley *et al.*, 2017). Il en ressort, par exemple,

que le gallate d'octyle, un conservateur alimentaire, présente une meilleure activité antimicrobienne et moins de dangers chimiques que les conservateurs actuellement utilisés. De façon tout aussi importante, il est possible d'utiliser des conservateurs naturels (extraits de romarin et d'origan, houblon, sel, sucre, vinaigre, alcool, etc.). Dans certains cas, et pour certains produits, d'autres stratégies de conservation peuvent être employées pour réduire les besoins en conservateurs chimiques.

4.4 Perspectives d'innovation en matière de procédés

Catalyse

La catalyse est le processus d'augmentation de la vitesse d'une réaction chimique en y ajoutant une substance appelée « catalyseur ». Le catalyseur n'est pas consommé pendant la réaction et peut donc continuer à agir. Les catalyseurs réduisent l'énergie d'activation (par ex. la chaleur) nécessaire au déclenchement d'une réaction, et offrent ainsi l'assurance d'une réaction plus complète et d'une utilisation plus efficace des matières premières.

Dans la plupart des cas, de petites quantités de catalyseur suffisent pour modifier la vitesse d'une réaction.

L'utilisation de catalyseurs pose problème lorsque des matières toxiques sont utilisées dans les réactions ou que la catalyse nécessite des conditions de réaction extrêmes qui amoindrissent l'intérêt du catalyseur. Certaines transformations organiques sont par exemple catalysées par des métaux de transition rares, comme le palladium, le rhodium, le ruthénium et l'iridium. S'il est

vrai qu'ils sont très efficaces, ces métaux sont disponibles en quantité restreinte, sont coûteux et possèdent des propriétés toxiques. En outre, certains procédés catalytiques nécessitent des conditions de réaction énergivores, par exemple des températures ou des pressions élevées. L'identification de catalyseurs ou de procédés catalytiques plus durables pourrait permettre de résoudre différents problèmes de durabilité et de libérer le potentiel de nombreuses innovations. Les stratégies adoptées pour faire progresser la durabilité de la catalyse sont notamment axées sur la mise au point de catalyseurs peu toxiques, de procédés nécessitant des conditions de réaction moins énergivores ou de catalyseurs permettant d'exploiter des sources d'énergie renouvelables dans le cadre des réactions.

Catalyse par des métaux présents en abondance dans la croûte terrestre

Les métaux présents en abondance dans la croûte terrestre, qui comprennent les métaux de transition de la première série tels que le manganèse, le fer, le cobalt, le nickel, le vanadium ou le chrome (Chirik et Morris, 2015) peuvent contribuer à renforcer l'utilisation durable des catalyseurs dans les réactions chimiques (ACS, 2015b). C'est pourquoi des travaux de recherche ont été menés pour mettre au point des catalyseurs homogènes basés sur des complexes utilisant des métaux peu toxiques et présents en abondance dans la croûte terrestre. Selon l'American Chemical Society (ACS), la catalyse par des métaux présents en abondance dans la croûte terrestre est vantée pour sa durabilité inhérente et ses avantages, à savoir sa faible toxicité et son impact minime sur l'environnement (ACS, 2020b). Certains complexes à base de métaux de la première série ont particulièrement retenu l'attention, à savoir le fer (Fe), le cobalt (Co), le nickel (Ni) et le manganèse (Mn) (Chakraborty, Leitus et Milstein, 2016).

Les métaux présents en abondance dans la croûte terrestre peuvent également faciliter un plus large éventail de transformations chimiques que les catalyseurs utilisés habituellement. Les récentes activités d'innovation portent, par exemple, sur l'utilisation de tels métaux pour la synthèse de nanomatériaux bien définis afin d'entraîner une

activité améliorée, pour réduire la quantité de métaux nobles nécessaires à la réaction, ou pour la photoactivation (Kaushik et Moores, 2017). Une autre application prometteuse consiste à utiliser le catalyseur à base de fer Fe-TAML® pour convertir des polluants nocifs, y compris des pesticides dangereux présents dans les sols, en substances moins toxiques ou inoffensives (Platt, 2004).

Organocatalyse

L'organocatalyse utilise comme catalyseur de petites molécules organiques constituées de carbone, d'hydrogène, de soufre et d'autres éléments non métalliques (amines, urée, acides, alcools, espèces halogénées, carbènes, entre autres) (Vitale *et al.*, 2016). Les organocatalyseurs peuvent être produits à partir de déchets, ce qui satisfait aux principes d'une chimie verte et plus durable (Meninno, 2020). Les avantages résident dans leur disponibilité, leur faible coût et leur faible toxicité. Les organocatalyseurs permettent également d'opérer des réactions dans des conditions plus modérées et moins dangereuses que celles requises par de nombreux autres catalyseurs.

Parmi les domaines d'application figurent notamment la synthèse organique et la synthèse de polymères, ainsi que la conversion de la biomasse pour produire toute une gamme de substances chimiques, de matériaux et de biocarburants. S'agissant de la conversion de la biomasse, on peut citer, à titre d'exemple, celle de la cellulose, du glucose et du fructose, la valorisation de furaldéhydes et la polymérisation organocatalytique de matières premières issues de la biomasse (Liu et Chen, 2014).

Biocatalyse

Les enzymes sont des catalyseurs protéiques. Elles catalysent des réactions très spécifiques et peuvent être modifiées pour catalyser la réaction voulue. La biocatalyse utilise des enzymes pour catalyser des réactions dans des conditions modérées, par ex. à température ambiante, ce qui nécessite peu d'apport externe d'énergie.

Autre avantage, la plupart des enzymes utilisées dans l'industrie ne sont pas dangereuses et sont biodégradables. Les propriétés catalytiques des enzymes permettent de mettre au point de nouvelles technologies, telles que la production de molécules chirales, de spécialités chimiques et de produits chimiques de base. Les enzymes sont obtenues à partir de ressources renouvelables peu coûteuses et leurs coûts sont stables.

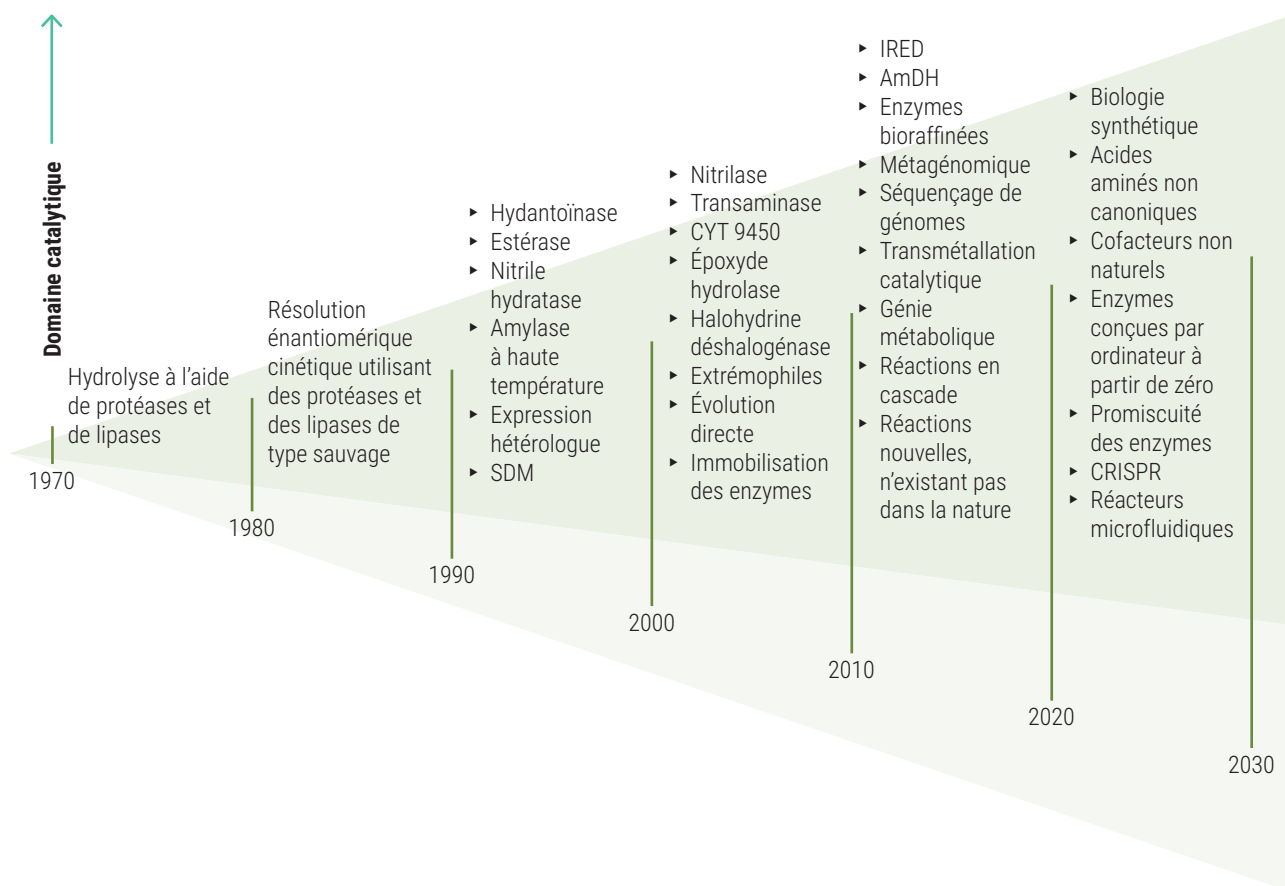
Il est possible d'étendre l'application de la biocatalyse grâce au séquençage d'un grand nombre de génomes microbiens qui, couplé aux progrès de la synthèse génique, permet d'avoir accès à une grande variété d'enzymes de type sauvage (Sheldon et Woodley, 2018). À l'aide d'outils d'évolution dirigée, les propriétés de celles qui présentent un intérêt peuvent ensuite être ajustées afin d'assurer leur intégration homogène dans un procédé prédéfini. Par exemple, la production biocatalytique de certains produits pharmaceutiques intermédiaires (par ex.

alcools et amines énantiomériquement pur) est aujourd'hui une technique de synthèse organique parfaitement au point. L'utilisation d'enzymes dans la production de polymères est un autre champ d'innovation prometteur (Kobayashi, Uyama et Kadokawa 2019).

Photocatalyse

La photocatalyse repose sur l'absorption de lumière par une ou plusieurs espèces réactives en présence d'un catalyseur. Elle convertit l'énergie photonique (par ex. rayonnement solaire) en énergie chimique à l'aide de catalyseurs semi-conducteurs, tels que le TiO₂, désignés sous le nom de photocatalyseurs. Elle peut être utilisée dans diverses applications, par exemple l'hydrolyse de l'eau pour produire de l'hydrogène qui sera utilisé comme carburant, la synthèse organique, et la décontamination d'effluents pollués (Ravelli *et al.*, 2009). Au nombre des applications

Figure 4.5: **Possibilités d'utilisation de la biocatalyse en synthèse organique durable** (Sheldon et Brady 2019, p. 2859)



spécifiques, on trouve les technologies propres à améliorer la photosynthèse artificielle (qui utilise le rayonnement pour convertir le CO₂ en produits chimiques organiques riches en énergie), ou le traitement de l'eau (en utilisant le rayonnement pour convertir les polluants toxiques en substances chimiques non toxiques).

Traitement par lots ou traitement continu

Le traitement par lots consiste à traiter des charges successives de matériaux en vrac dans le cadre d'étapes distinctes du procédé de production. Son opposé est le traitement continu, dans lequel des flux continus de matériaux s'écoulent dans un système de canaux, tuyaux ou tubes réagissent à leur confluence. Selon le Government Accountability Office des États-Unis (2018), le traitement continu permet d'utiliser les matériaux de manière plus efficace que le traitement par lots, consomme moins d'énergie, produit moins de déchets, consomme moins de solvants, fait appel à des procédés plus sûrs et assure une moins grande exposition aux produits chimiques.

Cette technologie satisfait donc à bon nombre des 12 principes de la chimie verte.

Bioraffinage

Une bioraffinerie est une installation qui intègre des procédés et équipements destinés à convertir la biomasse en carburants, énergie ou produits chimiques à valeur ajoutée. L'Agence internationale de l'énergie (AIE) a défini le bioraffinage comme la transformation durable de la biomasse en une gamme de produits biosourcés (aliments destinés à la consommation humaine ou animale, produits chimiques, matériaux) et en bioénergie (biocarburants, électricité et/ou chaleur) (Bell *et al.*, 2014). Les bioraffineries permettent de produire un grand nombre de substances chimiques en fractionnant la biomasse en produits intermédiaires (hydrates de carbone, protéines, triglycérides) qui peuvent ensuite être convertis en produits à valeur ajoutée.

Parmi les axes et les exemples d'innovation en rapport avec l'utilisation du bioraffinage à l'appui de la chimie verte et durable, on retiendra les suivants (WUR, n.d. b) :

Tableau 4.1: **Comparaison entre un réacteur chimique et un bioréacteur** (Verster *et al.*, 2014, p. 95)

Réacteur chimique	Bioréacteur classique	Conséquences pour l'ingénierie des bioréacteurs
Milieu réactionnel basique	Milieu réactionnel complexe	Incidence sur le traitement et la purification en aval, incidence éventuelle sur la fonctionnalité catalytique (« empoisonnement » des catalyseurs ou rétro-inhibition)
Forte concentration de réactifs et de produits	Faible concentration de réactifs et de produits	Inefficacité du transfert de masse et de chaleur
Augmentation du produit couplée à la diminution du substrat	Augmentation de la biomasse à mesure du déroulement de la transformation biochimique	Incidence sur le traitement et la purification en aval, optimisation non linéaire de la productivité
Le catalyseur doit être ajouté au système et peut avoir une durée de vie limitée.	Les micro-organismes synthétisent leurs propres catalyseurs (enzymes) – « régénération » des catalyseurs.	Dans un système bien conçu, le procédé peut s'auto-alimenter / s'auto-organiser au fur et à mesure de son déroulement.
Condition de réaction extrêmes	Conditions de réaction (température, pH) modérées	Procédé potentiellement plus sûr, moins énergivore. La production d'un gradient de refroidissement peut s'avérer problématique.

- ▼ Fermentation du glucose en acide succinique, procédé de substitution beaucoup moins énergivore que les méthodes de production traditionnelles à base de matière première pétrolière, avec des applications dans le domaine des polyuréthanes, des peintures, des revêtements, des adhésifs, des produits pharmaceutiques, etc.
- ▼ Conversion de composants issus de substrats et de produits secondaires peu coûteux en sources d'énergie telles que l'hydrogène.
- ▼ Mise au point de microalgues qui utilisent la lumière du soleil et le CO₂ comme sources d'énergie et de carbone pour produire des huiles et du biogazole de très bonne qualité, entre autres produits.

Microréacteurs

Les microréacteurs – également appelés réacteurs microstructurés ou réacteurs à microcanaux – sont des dispositifs dans lesquels les réactions chimiques en flux continu ont lieu dans un espace confiné dont les dimensions sont bien souvent inférieures à 1 mm. La technologie des microréacteurs et la chimie en flux peuvent potentiellement jouer un rôle important dans le développement d'une synthèse verte et durable. Cette technologie respecte le principe de l'économie d'atomes, s'appuie sur des solvants et autres auxiliaires moins dangereux, génère moins de déchets et facilite les analyses en temps réel à l'appui de la prévention de la pollution, ce qui permet, en substance, de pratiquer une chimie intrinsèquement plus sûre (Fanelli *et al.*, 2017).

4.5 Perspectives de la numérisation dans une optique de promotion de la chimie verte et durable

La numérisation et les technologies modernes de l'information peuvent grandement contribuer à promouvoir l'innovation dans le domaine de la chimie verte et durable, lorsque des évaluations solides de la durabilité sont réalisées. Dans le cadre de la fabrication de produits chimiques par exemple, la production et l'analyse de grands ensembles de données permettent d'obtenir des rendements et des débits plus élevés, de réduire la consommation énergétique et la pollution, et de renforcer l'efficacité de la maintenance (Fermeglia, Longo et Toma, 2009). Pour de nombreuses opérations chimiques, la concrétisation de ces avantages implique l'utilisation et la mise à niveau des technologies de l'information et des systèmes existants de contrôle des procédés (PNUE, 2019b).

La numérisation permet également d'expérimenter et de découvrir plus rapidement de nouvelles molécules à un coût moindre que ne le ferait un laboratoire (Davies *et al.*, 2016). Des logiciels de pointe permettent d'analyser les molécules

chimiques afin de déceler un certain nombre de propriétés dangereuses, d'où une réduction significative des essais sur les animaux (Pradeep, Friedman et Judson, 2020). Les innovations logicielles, couplées à la technologie informatique moderne, permettent également d'explorer l'espace chimique – environ 1060 molécules au total (Kirkpatrick et Ellis, 2004) – et de concevoir des molécules aux propriétés recherchées et présentant un intérêt pour le développement de matériaux durables et la réalisation des objectifs de durabilité.

L'agriculture est un des secteurs d'importation où les solutions informatiques peuvent tout particulièrement contribuer à promouvoir la durabilité (King, 2017). Les robots et les drones peuvent détecter les ravageurs à un stade précoce de leurs invasions, ce qui permet d'appliquer les pesticides avec précision et de réduire considérablement leur utilisation. Ces technologies permettent également de recueillir d'autres

données utiles pour progresser sur la voie de la durabilité, favorisant notamment l'utilisation efficace des engrais (en limitant le plus possible

les pertes dans l'environnement) et la réduction au minimum de l'utilisation des ressources en eau limitées.

4.6 Potentiel de l'innovation en matière de chimie verte et durable dans un secteur donné : exemple de l'énergie

Perspectives de la chimie verte et durable dans les secteurs clés

L'innovation dans le domaine de la chimie verte et durable peut favoriser la durabilité dans des secteurs importants de l'économie, notamment, mais non exclusivement, ceux de l'énergie, des transports, de l'agriculture, du textile et du tourisme. Compte tenu de l'importance du secteur de l'énergie dans la lutte contre les changements climatiques, ce secteur est présenté de façon succincte pour illustrer la pertinence de la chimie verte et durable et les résultats tangibles qu'elle peut produire dans la mise en place d'une transformation durable au niveau sectoriel.

Amélioration de l'efficacité énergétique grâce à l'innovation chimique

Le sixième principe de la chimie verte stipule que les besoins énergétiques ont des répercussions sur l'économie et l'environnement dont il faut tenir compte et qu'il faut réduire autant que possible. Les méthodes de synthèse doivent, dans la mesure du possible, être mises en œuvre à température et pression ambiantes (Anastas et Warner, 1998). Bien que d'importantes mesures aient été prises par l'industrie chimique pour promouvoir les économies d'énergie dans la production des substances chimiques, il est difficile de véritablement réaliser d'autres progrès en adoptant des mesures d'amélioration de l'efficacité des procédés, ce qui appelle l'attention sur la nécessité d'une rupture technologique, articulée autour des réactions de chimie verte qui sont moins gourmandes en énergie. Des recherches ont lieu

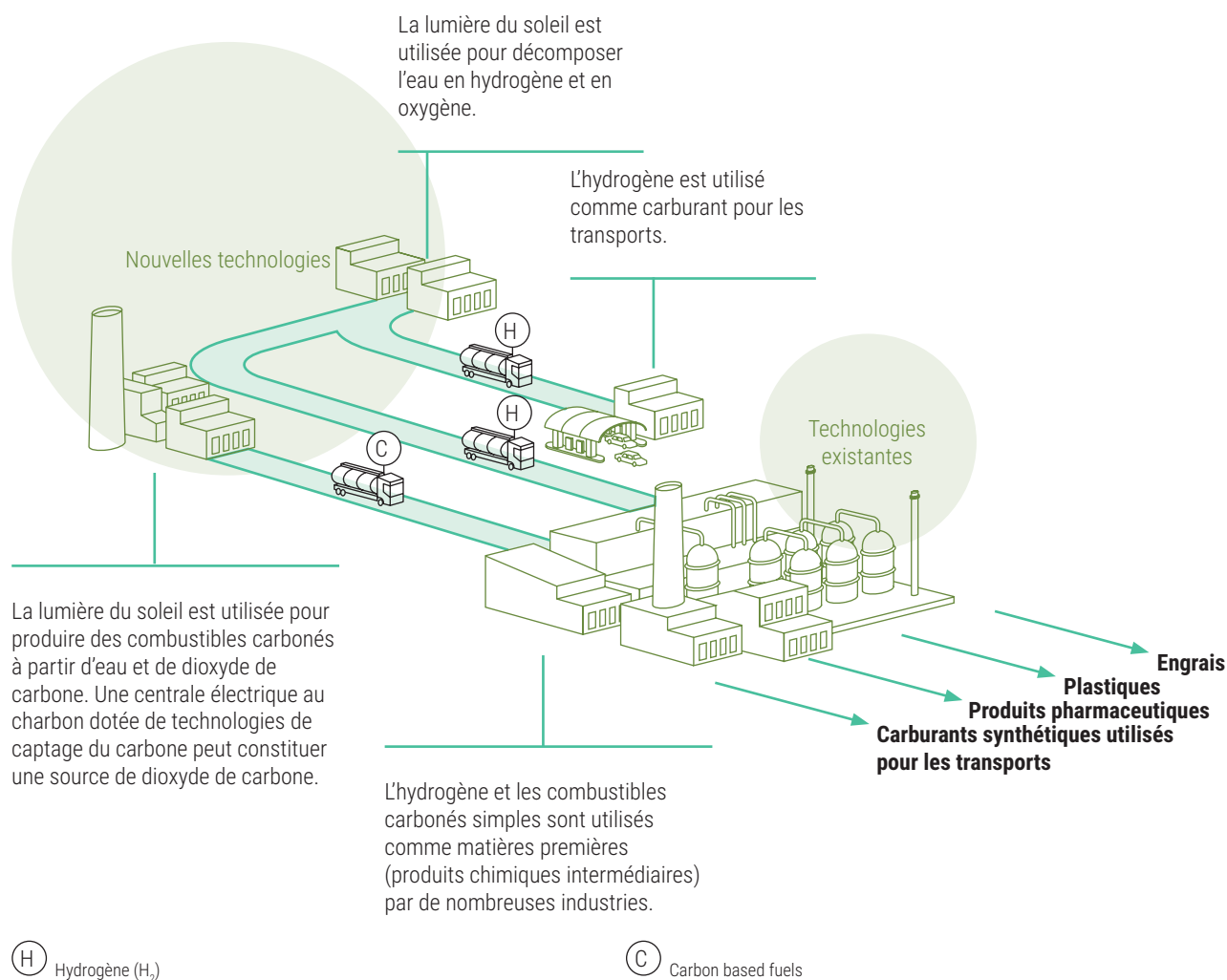
afin de remplacer les méthodes thermochimiques, par des concepts novateurs aux procédés plus légers et consommant moins d'énergie, tels que la synthèse électrochimique et d'autres techniques innovantes de catalyse. La demande pour des techniques de séparation passive utilisant des membranes a déjà commencé à dépasser celle des méthodes de séparation traditionnelles à la vue de leur rentabilité et performance. De nouveaux concepts technologiques durables dont l'énergie et les produits chimiques sont produits simultanément se profilent. Il faudra continuer à encourager et à développer ces technologies pour commercialiser ces innovations et parvenir à une industrie chimique énergétiquement efficace, sûre et résiliente.

Au-delà des innovations en matière de procédés, l'innovation chimique peut grandement contribuer à accroître l'efficacité énergétique et à réduire les émissions de gaz à effet de serre grâce à la mise au point de nouveaux produits et matériaux. À titre d'exemple, on peut citer les matériaux composites légers et recyclables, qui permettent de consommer moins d'énergie grâce à leur poids réduit. Leurs applications concernent de multiples domaines, dont les transports (avions, voitures), la production d'énergie au moyen d'éoliennes, etc.

Citons aussi, comme autre domaine, la mise au point de matériaux de construction à haut rendement énergétique. Par exemple, l'aérogel de cellulose (CA) obtenu à partir de déchets de tiges de thé (TSW) est un bon isolant thermique et un bon retardateur de flamme. Il est respectueux de l'environnement, thermiquement stable et peut être produit à faible coût (Kaya et Tabak, 2020).



Figure 4.6: **Formes que pourrait prendre la production de combustibles solaires** (Royal Society of Chemistry, 2020)



Le défi de la chimie verte et durable est de mettre au point des matériaux performants et de faire en sorte qu'ils soient non toxiques et recyclables. Par conséquent, les « matériaux verts » vantés pour leur potentiel d'économies d'énergie doivent être évalués au regard des critères de la chimie verte et durable, avant de pouvoir être considérés comme plus durables.

Mise au point de combustibles solaires grâce à l'innovation chimique

Les combustibles solaires font appel à des technologies qui utilisent la lumière du soleil pour produire des molécules d'intérêt, telles que l'hydrogène et le méthanol, à partir d'eau et

de dioxyde de carbone. La nouveauté de cette approche réside dans l'utilisation directe de l'énergie solaire pour convertir l'eau et le dioxyde de carbone en substances chimiques déjà connues et largement utilisées. Le concept s'applique aux combustibles utilisés pour les transports et la production d'électricité, ainsi qu'aux matières premières chimiques utilisées pour la production de substances pétrochimiques, d'engrais, de plastiques et de produits pharmaceutiques. Des prototypes commerciaux devraient être disponibles d'ici 10 à 15 ans (Royal Society of Chemistry, 2020).

La photosynthèse artificielle est un procédé chimique qui reproduit par biomimétisme le processus naturel de la photosynthèse pour

produire des hydrates de carbone et de l'oxygène à partir d'eau et de dioxyde de carbone en se servant de la lumière du soleil. Elle offre la possibilité d'utiliser le dioxyde de carbone excédentaire pour stocker l'énergie solaire sous forme de liaisons chimiques. Les chimistes ont déjà réussi à produire des combustibles par photosynthèse artificielle (ScienceDaily 2019).

Parmi les champs d'innovation explorés dans l'utilisation du rayonnement solaire pour transformer le CO₂ en molécules organiques d'intérêt, on peut citer : la dissociation photocatalytique de l'eau, qui convertit l'eau en hydrogène et en oxygène (électrolyse), un thème de recherche majeur dans le domaine de la photosynthèse artificielle ; l'absorption photoactivée du CO₂, qui reproduit la fixation naturelle du carbone ; la conception et l'assemblage de dispositifs pour la production directe de combustibles solaires ; la photoélectrochimie et ses applications dans les piles à combustible ; et la conception d'enzymes et de micro-organismes photoautotrophes pour la production de biocarburants et d'hydrogène à partir de la lumière du soleil.

Amélioration de la production d'énergie photovoltaïque grâce à l'innovation chimique

L'innovation chimique contribue également à la promotion du solaire photovoltaïque de diverses façons : les technologies solaires photovoltaïques organiques et sensibilisées aux colorants offrent la possibilité de mettre au point des panneaux solaires légers, souples, colorés et peu coûteux ; les nouveaux matériaux utilisés pour les bardeaux solaires protègent les habitations tout en produisant de l'électricité ; les nouvelles encres au silicium peuvent augmenter l'efficacité des cellules solaires ; et les matériaux de substitution

et techniques de valorisation matière (par ex., pour le photovoltaïque au silicium) permettent de réduire la dépendance vis-à-vis des matières premières critiques telles que les métaux rares (Plateforme technologique européenne pour la chimie durable [SusChem], 2019), pour ne citer que ces exemples.

Amélioration du stockage de l'énergie grâce à l'innovation chimique

Les batteries peuvent donner la possibilité d'assurer à la société un approvisionnement constant en énergie produite à partir de sources renouvelables. Toutefois, de nombreuses batteries contiennent encore des métaux toxiques tels que l'aluminium, le cadmium, le mercure, le nickel, le plomb, le fer, le zinc, le calcium, le magnésium et le lithium. Ce dernier par exemple, qui joue un rôle clef dans le développement des applications pour véhicules et réseaux électriques, présente des risques de pénurie d'approvisionnement et pose des problèmes de recyclage et d'élimination.

Les innovations chimiques offrent des perspectives d'amélioration de la sécurité, de la fiabilité, de la durabilité et de la recyclabilité des batteries. Les innovations portent, entre autres, sur les nouveaux matériaux utilisés pour les batteries au lithium-ion ; les batteries à circulation redox ; les batteries métal-air ; les batteries organiques ; et les matériaux pour le stockage de masse d'énergie thermosolaire et thermique. Les nouvelles chimies s'intéressant aux cations monovalents (K⁺, Na⁺) ou divalents (Mg²⁺ et Ca²⁺), ainsi que les technologies permettant de recycler efficacement le lithium sont également des domaines prometteurs. Dans une perspective de durabilité, le sodium et ses sels (PF₆⁻, TFSI⁻, FSI⁻), moins toxiques que leurs homologues au lithium, constituent une solution de remplacement du lithium métal très prometteuse (Larcher et Tarascon, 2015).



5

POLITIQUES, OUTILS ET INSTRUMENTS VISANT À PROMOUVOIR LA CHIMIE VERTE ET DURABLE >

5.1	Rôle des politiques, outils et instruments de facilitation dans la promotion de la chimie verte et durable	62
5.2	Politiques, réglementation et normalisation	62
5.3	Méthodes d'analyse du cycle de vie et de conception durable	65
5.4	Partage des connaissances et mécanismes de récompenses	68
5.5	Approches et principes stratégiques d'appui	68
5.6	Intégration de la chimie verte et durable dans la gouvernance d'entreprise	71

5.1 Rôle des politiques, outils et instruments de facilitation dans la promotion de la chimie verte et durable

Bien que le marché de la chimie verte et durable soit en pleine croissance, il faut encourager l'innovation dans ce domaine pour accroître sa part de marché. Le présent chapitre fait le point sur les politiques, les outils et les instruments qui peuvent contribuer à créer les conditions propices nécessaires. Ils vont des mesures réglementaires et normatives aux outils et méthodes d'évaluation, en passant par le renforcement de la gouvernance d'entreprise, du partage des connaissances et des mécanismes de récompenses. Une question importante qui se pose pour l'ensemble des politiques, outils et instruments est celle de savoir comment les élaborer et les appliquer en tenant pleinement et systématiquement compte des principes directeurs de la chimie verte et durable. Le chapitre 6 s'intéressera aux secteurs et programmes de facilitation à caractère plus stratégique. Ces deux chapitres réunis présentent une série de mesures facilitatrices pour accélérer l'innovation dans le domaine de la chimie verte et durable et sa mise en œuvre sur le marché.

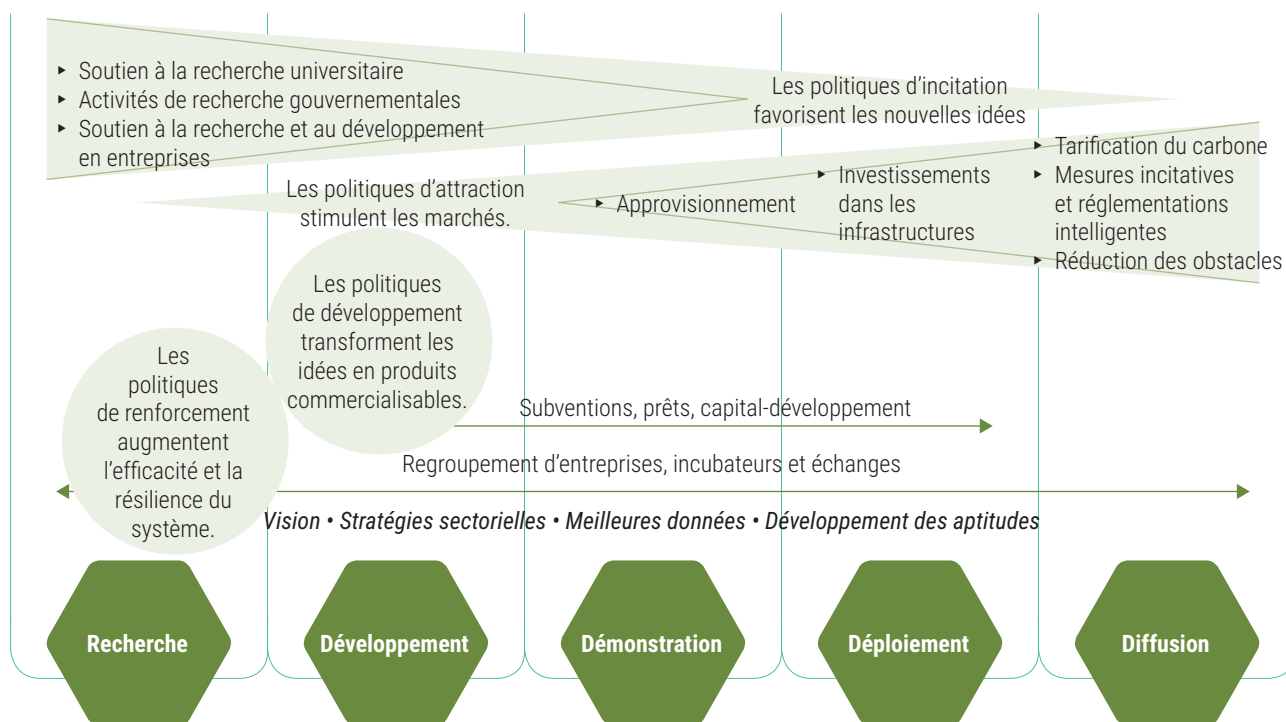
5.2 Politiques, réglementation et normalisation

Politiques d'incitation et d'attraction

Les orientations et les actions stratégiques visant à promouvoir l'innovation peuvent être classées en quatre catégories : 1) les politiques d'incitation qui favorisent les nouvelles idées ; 2) les politiques d'attraction qui contribuent à stimuler la demande du marché ; 3) les politiques de développement qui contribuent à transformer les idées en produits commercialisables ; et 4) les politiques de renforcement qui s'appliquent à tout le système d'innovation propre et augmentent son efficacité et sa résilience (Elgie et Brownlee, 2017). Les autres caractéristiques des instruments stratégiques qui jouent un rôle sont notamment la rigueur, la prévisibilité et la souplesse.

Bien qu'il s'agisse de classifications générales, ce cadre montre comment les interventions publiques cohérentes et avisées, qui tiennent compte de la culture dans laquelle elles ont lieu, pourraient être structurées afin d'orienter les différents éléments du système d'innovation dans une direction qui favorise l'innovation dans le domaine de la chimie verte et durable. La stratégie nationale en faveur de la bioéconomie adoptée par l'Allemagne est un exemple de stratégie s'articulant autour de méthodes d'action très diverses, y compris des mesures d'incitation et d'attraction. Elle énonce les mesures à mettre en œuvre, en s'appuyant sur la stratégie nationale de recherche BioEconomie 2030 et sur la stratégie politique nationale sur la bioéconomie pour regrouper les différents volets politiques au sein d'un cadre cohérent (Ministère

Figure 5.1: **Actions stratégiques favorisant l'innovation technologique** (d'après Elgie et Brownlee, 2017, p. 15)



allemand de l'éducation et de la recherche et Ministère allemand de l'alimentation et de l'agriculture, 2020).

Politiques gouvernementales visant à stimuler la substitution et l'innovation dans le domaine de la chimie verte et durable

L'identification des produits chimiques ou groupes de produits chimiques préoccupants, la mise en place de restrictions explicites sur certaines utilisations et la définition d'objectifs en matière de substitution par les autorités publiques peuvent favoriser l'innovation volontaire et avant-gardiste. En Europe, l'inscription des substances extrêmement préoccupantes (SVHC) sur la liste candidate en vue de leur inclusion dans la liste des substances soumises à autorisation de l'annexe XIV du règlement REACH a donné forme à l'intention de l'autorité de réglementation d'adopter des mesures de gestion des risques (Agence européenne des produits chimiques, 2011). Celles-ci incitent l'industrie à mettre les activités de remplacement au premier rang des

priorités. Hoffman-La Roche, par exemple, a mis en œuvre un programme d'action en faveur de la substitution pour se conformer au règlement REACH bien avant la date butoir réglementaire en évaluant et en testant des solutions de remplacement (Buxton, 2016).

Au niveau mondial, la Convention de Stockholm stimule l'innovation en dressant une liste des substances chimiques et des polluants organiques persistants qui font l'objet d'un accord mondial visant à mettre progressivement fin à leur utilisation. Il en va de même pour la Convention de Minamata sur le mercure. Ces accords mondiaux ne couvrent toutefois qu'un nombre limité de substances chimiques préoccupantes. Pour élargir et renforcer son cadre d'action en faveur de l'innovation, la Commission européenne a publié, en octobre 2020, une stratégie pour la durabilité dans le domaine des produits chimiques qui s'inscrit dans le cadre de l'ambition zéro pollution de l'UE, un des engagements clés du pacte vert pour l'Europe. Cette stratégie vise à mieux protéger les citoyens et l'environnement et à stimuler l'innovation en faveur de produits chimiques de substitution sûrs et durables (CE, 2019).

Les politiques gouvernementales peuvent également être de nature facilitatrice. Aux États-Unis, la loi de 2019 sur la recherche et le développement en chimie durable (Sustainable Chemistry Research and Development Act of 2019), adoptée en juillet 2020 par le Sénat américain, prévoit la mise en place, sous l'égide du Conseil national de la science et de la technologie, d'une instance interinstitutionnelle chargée de coordonner les activités et les programmes fédéraux en faveur de la chimie durable. Les parties participant aux travaux de cette instance mènent des activités précises à l'appui de la chimie durable, notamment en intégrant celle-ci dans les programmes existants de recherche, de développement, de démonstration, de transfert de technologie, de commercialisation, d'éducation et de formation (Lipinski, 2019). L'instance est tenue d'élaborer une feuille de route pour la chimie durable dans un délai de deux ans à compter de la date de promulgation de la loi. Dans un premier temps, elle engagera des consultations avec les parties prenantes concernées, y compris les acteurs internationaux, afin d'élaborer une définition du terme « chimie durable ».

Étiquetage, certification et transparence

Permettre aux travailleurs, aux citoyens, aux consommateurs et aux autres parties prenantes intéressées d'avoir accès à différents types d'informations ne les aide pas seulement à prendre les mesures de protection nécessaires le cas échéant, mais contribue aussi à orienter la demande vers des substances chimiques et des produits plus sûrs et plus durables.

Les systèmes d'étiquetage et de certification, ainsi que l'obligation de divulguer la liste des constituants, permettent au public de repérer les substances chimiques et les produits plus sûrs et durables, pour autant que les informations présentées le soient de manière transparente, fiable, claire, pertinente et accessible. L'application du Système général harmonisé de classification et d'étiquetage des produits chimiques (SGH) est une mesure importante pour informer les travailleurs et les consommateurs des dangers chimiques et des mesures de protection nécessaires. Il est important que les informations soient facilement

accessibles où et quand le consommateur en a besoin, par exemple lorsqu'il effectue des recherches sur ses options d'achat, sur le lieu de vente ou d'utilisation (PNUE, 2017a).

De nouveaux outils d'information, tels que les applications pour smartphones qui s'articulent autour des initiatives réglementaires et des avis publiés par les consommateurs, voient également le jour et constituent de précieux outils pour la diffusion de l'information auprès des consommateurs. Les applications ToxFox et AskReach, par exemple, attirent l'attention sur les substances chimiques figurant sur la liste des substances candidates du règlement REACH, ce qui aide les utilisateurs à prendre des décisions éclairées et stimule la demande de produits non toxiques et durables.

Les politiques de facilitation, telles que le droit à l'information des travailleurs, des consommateurs et des communautés, la participation du public et l'accès à la justice, couplés aux technologies innovantes, peuvent être des ressorts essentiels pour progresser sur la voie de la chimie verte et durable. Les exemples comprennent la Convention sur l'Accès à l'Information, la Participation du Public au Processus Décisionnel et l'Accès à la Justice en Matière d'Environnement, ou l'Accord Régional sur l'Accès à l'Information, la Participation Publique et la Justice à propos des Questions Environnementales en Amérique latine et dans les Caraïbes.

Pour une analyse détaillée de ce sujet, se reporter au chapitre 8 de la partie IV du rapport GCO II.

Participation du public et engagement des parties prenantes

La participation effective du public dans la prise de décision relative aux produits chimiques et aux produits connexes reste cruciale pour assurer la protection de l'environnement, la gestion sûre des produits chimiques et des déchets, ainsi que la consommation et la production durables. La participation du public devrait être assurée en ce qui concerne les projets, les plans, les programmes, les politiques et la législation. Par exemple, les entreprises exerçant des activités

sont encouragées à identifier le public concerné (non seulement les communautés locales mais aussi les organisations non gouvernementales promouvant la protection de l'environnement), à les impliquer dans la prise de décision et à fournir

les informations sur les objectifs de leur demande avant de demander un permis. Cela s'applique également lorsque l'exploitant industriel souhaite modifier ou mettre à jour les conditions d'exploitation de l'activité.

5.3 Méthodes d'analyse du cycle de vie et de conception durable

Méthodes d'analyse du cycle de vie et réflexion sur le cycle de vie

Les approches axées sur le cycle de vie aident les scientifiques, les développeurs et les gestionnaires de produits à comprendre les incidences potentielles d'un produit au cours des nombreuses étapes de sa production, de son utilisation et de sa fin de vie. L'analyse du cycle de vie (ACV) est définie par l'Organisation internationale de normalisation (ISO) comme une méthode de collecte et d'évaluation des contributions, des résultats et des incidences environnementales potentielles d'un système de produit tout au long de son cycle de vie (ISO, 2016). L'évaluation et la gestion des substances chimiques tout au long de leur cycle de vie permettent d'analyser les performances environnementales des produits au regard des objectifs de réduction de la pollution et de l'exposition (Fantke et Illner, 2019). L'ACV permet également d'éviter le transfert des charges

d'une phase du cycle de vie à l'autre (par ex., réduction de l'extraction de matières premières grâce au recyclage au prix d'une augmentation des résidus de contaminants dans les produits recyclés) (Hellweg et Milà i Canals, 2014).

L'ACV s'intéresse aux effets sur la santé humaine, comme ceux provoqués par la toxicité du produit et par la pollution qu'il cause (Arvidsson *et al.*, 2018). Pour évaluer les incidences sociales de manière plus approfondie, l'analyse sociale du cycle de vie (AsCV) peut être mise à profit (Andrews *et al.*, 2009), tandis que l'analyse de la durabilité du cycle de vie couvre les trois dimensions (économique, sociale et environnementale) du développement durable (Guinée, 2016 ; PNUE, 2020).

Les méthodes d'analyse du cycle de vie fournissent de précieux éclairages en vue de la prise de décisions, mais peuvent nécessiter des ressources importantes et des ensembles de données qui sont

Encadré 5.1: Initiative sur le cycle de vie (PNUE, 2020)

L'Initiative sur le cycle de vie est un partenariat multipartite public-privé qui permet aux décideurs, tant dans le secteur privé que dans le secteur public, d'appliquer à l'échelle mondiale les connaissances fiables relatives au cycle de vie. Hébergée par le PNUE, cette Initiative se veut à l'interface entre les utilisateurs et les spécialistes des approches axées sur le cycle de vie. Elle offre un forum mondial permettant de mettre en place un processus de formation de consensus à fondement scientifique pour aider à orienter les décisions et les politiques vers la vision commune de la durabilité en tant que bien public. Elle formule des avis faisant autorité sur la fiabilité des outils et la rationalité des approches en prenant appui sur son partenariat multipartite (associant gouvernements, entreprises, organisations scientifiques et de la société civile). L'initiative facilite l'application des connaissances relatives au cycle de vie dans le cadre du programme mondial de développement durable afin d'atteindre les objectifs mondiaux plus rapidement et plus efficacement.

difficiles à obtenir. Des défis se posent également pour ce qui est d'évaluer les risques chimiques et les effets sur la santé humaine et l'environnement au cours des différentes étapes du cycle de vie d'un produit, ainsi que la recyclabilité des matériaux. La série des normes ISO 14000 fournit un ensemble largement reconnu de principes à appliquer pour procéder aux analyses du cycle de vie. Cependant, certains éléments sont sujets à interprétation, comme la définition du périmètre de l'étude. De ce fait, différentes études d'ACV peuvent produire des résultats différents, ce qui rend les comparaisons très difficiles.

Compte tenu de certaines des limites susmentionnées, le concept de réflexion sur le cycle de vie a été mis en avant et adopté, par exemple par le Conseil national de la recherche des États-Unis dans le cadre de son guide sur la sélection des solutions de substitution chimique (Conseil national de la recherche des États-Unis, 2014). La réflexion sur le cycle de vie est une méthode souple intégrant une analyse qualitative permettant de mieux repérer les éventuelles contreparties, sans procéder à l'évaluation quantitative prévue par l'ACV.

Évaluation des alternatives pour les produits chimiques préoccupants

L'évaluation des alternatives fournit une approche systématique de l'évaluation des produits chimiques, du processus et de la conception des alternatives des produits chimiques préoccupants. En l'appliquant de façon systématique, cette approche guide la transition vers des produits chimiques, des matériaux et des produits plus sûrs et plus durables et minimise les risques de conséquences involontaires (UNEP 2019b). Les connaissances et les compétences nécessaires à l'évaluation des alternatives – toxicologie, ingénierie, santé et sécurité – sont complémentaires de celles nécessaires à la chimie verte et durable et peuvent être intégrées à la conception de nouveaux produits chimiques.

L'approche interdisciplinaire impliquée dans l'évaluation des alternatives guide minutieusement l'examen des changements et des potentiels

compromis entre les alternatives à un produit chimique préoccupant aux stades de la fabrication, de l'utilisation et de la fin de vie des alternatives et identifie les possibilités de réduire les impacts ainsi que les besoins non satisfaits que la chimie verte et durable peut résoudre. Par exemple, le mycélium, la structure végétative des racines d'un champignon, est une solution de chimie verte utilisée pour fabriquer des emballages verts innovants et d'autres matériaux. Tout en améliorant la durabilité, l'exposition au mycélium vivant pendant la production (fabrication de moules d'emballage) peut entraîner une potentielle exposition à des allergènes si celle-ci n'est pas contrôlée (Żukiewicz-Sobczak 2013).

Le manque de compréhension des considérations relatives à l'environnement, à la santé et à la sécurité chez les chimistes et les concepteurs développeurs de nouvelles technologies, en particulier dans les universités et les petites start-ups, peut entraîner par inadvertance des expositions problématiques. Pour soutenir les évaluations des alternatives compatibles avec la chimie verte et durable, une multitude de conseils et de ressources sont disponibles (UNEP 2019b). Par exemple, le site internet U.S. Occupational Safety and Health Administration's Transitioning to Safer Alternatives propose des approches que les petites entreprises peuvent utiliser pour identifier et évaluer les compromis potentiels associés aux alternatives.

Gestion durable des matériaux

La gestion durable des matériaux est une approche systémique permettant d'utiliser et de réutiliser les matériaux de manière plus productive tout au long de leur cycle de vie. L'examen de l'ensemble du cycle de vie d'un produit permet de repérer les possibilités à exploiter pour atténuer les effets néfastes sur l'environnement, préserver les ressources et réduire les coûts (US EPA, 2020a). La gestion durable des matériaux nécessite d'évaluer, entre autres critères, la teneur en substances dangereuses des matériaux et des produits tout au long de leur cycle de vie, ce qui impose une divulgation complète de leur composition et des processus renforcés de

partage des connaissances d'un bout à l'autre de la chaîne d'approvisionnement (y compris les recycleurs). Elle contribue à réduire à un minimum les rejets de substances chimiques provenant des stocks de matériaux et produits, et à générer des matières premières secondaires sans danger et durables dans le cadre d'une économie circulaire. L'emballage est un bon exemple de la contribution importante que peut représenter l'innovation en matière de chimie verte et durable pour la mise au point de matériaux non toxiques et plus durables (Sustainable Packaging Coalition, 2020).

Réflexion conceptuelle et conception de produits durables

La réflexion conceptuelle est une méthode de résolution de problèmes complexes, y compris ceux de durabilité (Buhl *et al.*, 2019). À l'inverse des approches traditionnelles qui abordent une tâche du point de vue de la solvabilité technique sur laquelle elles tablent, la réflexion conceptuelle place les besoins du client (ainsi que les inventions centrées sur les utilisateurs) au cœur du processus, ce qui nécessite des échanges permanents entre l'innovateur et le client. La réflexion conceptuelle est aussi un moyen d'accroître les compétences de l'utilisateur, ou des entreprises qui y font appel, en matière de résolution de problèmes, pour toutes sortes d'innovations dans le domaine des produits et des services. La méthode est donc utilisée pour réviser les processus internes des entreprises dans différents domaines, par exemple les finances et la comptabilité, la gestion de la chaîne d'approvisionnement, l'administration du personnel et la gestion des clients (Waerder, Stinnes et Erdenberger, 2017). On trouvera dans Buhl *et al.* (2019) une évaluation qui s'attache à expliquer pourquoi et comment la réflexion conceptuelle peut favoriser le développement de l'innovation sous une forme qui place la durabilité au cœur des pratiques.

La prise en considération d'impératifs de non-toxicité dans le processus de conception des produits peut être un moteur d'innovation sur la voie d'une chimie verte et durable. Par exemple, la Commission européenne a proposé,

en septembre 2020, une initiative visant à réviser la directive actuelle sur l'écoconception et à préconiser des mesures législatives supplémentaires pour améliorer la durabilité des produits mis sur le marché européen. L'initiative s'intéresse, entre autres, aux substances chimiques nocives dans des secteurs tels que l'électronique et les technologies de l'information, les textiles, l'ameublement, l'acier et le ciment (CE, n.d.).

Gestion durable de la chaîne d'approvisionnement et des achats

La gestion durable de la chaîne d'approvisionnement permet de veiller à ce que les décisions d'achat et de passation de marchés respectent les critères de durabilité, ce qui crée une dynamique incitant les fournisseurs en amont à être présents sur les marchés dynamiques des produits durables. Le concept englobe la conception et le développement des produits, la sélection des matériaux (y compris l'extraction des matières premières ou la production agricole), la fabrication, l'emballage, le transport, le stockage, la distribution, la consommation, le retour et l'élimination (Sarkis, 2019).

L'adoption de pratiques durables (et résilientes) de gestion de la chaîne d'approvisionnement peut aider les organisations et les entreprises, par le biais de leurs décisions d'achat, non seulement à réduire l'incidence néfaste de leurs activités sur l'environnement et la santé humaine, mais aussi à optimiser leurs opérations de bout en bout, à réaliser des économies et à améliorer leur rentabilité et leur durabilité dans le même temps. L'initiative « Together for Sustainability » (« Tous ensemble pour la durabilité ») est un exemple de programme de gestion durable de la chaîne d'approvisionnement dans le secteur chimique. Il s'agit d'une initiative conjointe réunissant 26 entreprises du secteur chimique autour d'une norme unique d'audit et d'évaluation, qui permet de créer une dynamique en faveur de l'innovation au sein de ces entreprises afin de régler les problèmes de durabilité recensés (Together for Sustainability, 2020).

5.4 Partage des connaissances et mécanismes de récompenses

Le partage des connaissances entre les secteurs public et privé est un instrument indispensable pour assurer un partage généralisé et organisé des connaissances. Le déploiement de plateformes de gestion des connaissances à différents niveaux peut donc contribuer à étayer les efforts fournis par les parties prenantes des secteurs public et privé en vue de promouvoir l'innovation dans le domaine de la chimie verte et durable. Les échanges d'informations entre gouvernements pourraient aider à tisser des liens de coopération, trouver des solutions aux problèmes qui se présentent et harmoniser les approches et les pratiques. Ils pourraient porter, par exemple, sur les connaissances en matière de substances chimiques, ainsi que sur les solutions, les produits et les substituts à caractère novateur et durable. En outre, ils pourraient favoriser la mise en commun des meilleures pratiques et politiques, ainsi que la création d'un environnement porteur et le renforcement des effets résultants. Sur le plan international, les pays à faible revenu et à revenu intermédiaire pourraient bénéficier d'une circulation plus fluide et mieux organisée de l'information, adaptée à leurs besoins en connaissances dans le domaine de la chimie verte et durable.

Les mécanismes de récompenses peuvent donner un statut crédible aux innovations en matière de chimie verte et durable, lorsqu'il est fait appel à des avis d'experts lors de la procédure de sélection. Par exemple, les Green Chemistry Challenge Awards (Prix spéciaux de chimie verte) créés par l'Agence pour la protection de l'environnement des États-Unis (EPA) assurent, depuis plus de 20 ans, la promotion des innovations dans le domaine de la chimie verte. Les prix récompensent les technologies qui intègrent les principes de la chimie verte dans la conception, la fabrication et l'utilisation de produits chimiques (US EPA, 2020b). Le défi de la chimie verte et durable de la Fondation Elsevier, lancé en 2015, est un défi thématique axé sur les innovations chimiques qui ont un impact positif sur le développement durable (Elsevier, 2020b). Le défi de l'innovation, lancé en 2018 par le Centre international pour une chimie durable (ISC3), récompense des start-up pionnières dans des thématiques qui changent chaque année (ISC3, 2020b). Enfin, la présentation d'initiatives prometteuses de recherche en chimie verte et durable dans des revues en libre accès peut susciter une prise de conscience accrue de l'importance de ces travaux.

5.5 Approches et principes stratégiques d'appui

Approche de précaution

L'approche de précaution éclaire la prise de décisions, lorsque la robustesse des connaissances sur les incidences possibles n'est pas établie et que les conséquences négatives sont potentiellement importantes. Une définition bien connue de l'« approche de précaution » est consacrée par la

Déclaration de Rio de 1992 sur l'environnement et le développement, selon laquelle : « En cas de risque de dommages graves ou irréversibles, l'absence de certitude scientifique absolue ne doit pas servir de prétexte pour remettre à plus tard l'adoption de mesures effectives visant à prévenir la dégradation de l'environnement ». Des exemples d'utilisation de l'approche de précaution en vue



de favoriser l'innovation et le remplacement des substances chimiques préoccupantes sont donnés dans Gee *et al.* (2013). Cette approche peut donc jouer un rôle important dans la promotion de l'innovation en matière de chimie verte et durable.

Vigilance-produits

La vigilance-produits est une stratégie de gestion des produits qui vise à réduire autant que possible l'impact d'un produit à tous les stades de son cycle de vie, ce qui inclut la gestion de fin de vie. Elle présente un intérêt pour les scientifiques, les ingénieurs et les toxicologues, ainsi que pour

tous ceux qui conçoivent, produisent, vendent ou utilisent un produit. Quiconque a la capacité d'influer sur les incidences environnementales du produit considéré tout au long de son cycle de vie a une responsabilité particulière. La personne concernée est habituellement le producteur, quoique d'autres acteurs, notamment les citoyens, les consommateurs et les responsables de l'élimination, se doivent également d'agir (Northwest Product Stewardship Council, n.d.). La détermination des effets des substances chimiques sur l'environnement et la santé humaine à tous les stades de la chaîne de valeur (par ex., l'élimination non écologiquement rationnelle des produits électroniques contenant des substances

chimiques toxiques) donne la possibilité aux entreprises du secteur chimique et aux entreprises en aval d'unir leurs efforts pour encourager la prise en compte des principes directeurs de la chimie verte et durable dans le cadre de la conception de produits durables.

Responsabilité élargie du producteur

La responsabilité élargie du producteur (REP) est une approche stratégique, volontaire ou prescrite par la loi, qui oblige les producteurs à prendre en charge de manière responsable un produit lors des étapes suivantes de la chaîne de valeur, y compris l'élimination. Les responsabilités peuvent être d'ordre financier et/ou matériel. Il s'ensuit la mise en place d'incitations et de modèles commerciaux novateurs qui permettent de lutter contre les déchets à la source et favorisent la conception de produits durables et non toxiques dans l'optique d'une économie circulaire. Le caractère volontaire de la REP dépend des approches réglementaires adoptées spécifiquement par chaque pays.

La REP est particulièrement pertinente pour développer de nouveaux produits et groupes de produits, tels que les appareils électriques et électroniques (OCDE, n.d.) ou les matériaux d'emballage. Par exemple, Coop Danemark a délibérément chargé un de ses fournisseurs d'entreprendre des travaux de recherche et d'innovation afin de remplacer certaines substances chimiques fluorées présentes dans les emballages alimentaires par un produit de substitution durable (non chimique) (Green Science Policy Institute, 2013) pour répondre aux préoccupations des consommateurs en matière de sécurité. Outre une conception exempte de substances chimiques préoccupantes lors de la mise au point des produits et la prévention des déchets à la source, la REP favorise le traitement et le recyclage rationnels des produits chimiques dangereux à la fin de leur vie utile.

Responsabilité élargie du consommateur

Le concept de « responsabilité élargie du consommateur » complète celui de REP, mais n'a pas vocation à le remplacer. Il encourage les

consommateurs à faire des choix durables, par exemple grâce aux programmes d'achat avec reprise lors de l'acquisition d'un nouvel appareil, qui sont dédiés aux marchés de l'électronique grand public (Sheu et Choi, 2019). Les modèles commerciaux de ce type ont pour objectif d'aider les consommateurs à remplacer leurs anciens appareils par des appareils plus performants, à adopter des modèles de consommation plus durables et à réduire leur production de déchets. Lorsque les consommateurs se voient offrir de telles possibilités et en bénéficient, les acteurs du secteur privé sont plus enclins à concevoir des produits plus durables et des modèles commerciaux circulaires.

Responsabilité sociale des entreprises (RSE)

La responsabilité sociale des entreprises est un concept qui permet aux entreprises d'intégrer les préoccupations sociales et environnementales dans leurs activités commerciales et dans leurs interactions avec leurs parties prenantes et les collectivités au sein desquelles elles sont implantées. Elle vise à aider les entreprises à concilier les impératifs économiques, environnementaux et sociaux (approche dite du triple bilan) (Organisation des Nations Unies pour le développement industriel [ONUDI], 2020). Des politiques de responsabilité sociale des entreprises pourraient être mises en place pour faire évoluer le modèle économique des entreprises vers une plus grande durabilité, notamment grâce à des dispositions spécifiques visant à favoriser la réalisation des objectifs de la chimie verte et durable dans l'ensemble de l'entreprise.

Prise en compte de l'équité femmes-hommes et des groupes vulnérables

Les femmes, les enfants, les groupes à faible revenu et les personnes de couleur comptent parmi les groupes vulnérables qui sont soumis à une exposition disproportionnellement élevée à des substances chimiques dangereuses (Temper *et al.*, 2018 ; PNUE, 2019b ; Woo *et al.*, 2019 ; Johnston et Cushing, 2020). Pareil constat appelle à mettre en

place des mesures d'intervention et d'innovation spécifiques pour protéger leur santé contre les substances chimiques toxiques. L'application des objectifs de la chimie verte et durable pour dégager les mesures nécessaires peut jouer un rôle important dans la mise en place d'une protection adéquate et dans la mise en œuvre de « l'équité de traitement pour les femmes et les hommes, en fonction de leurs besoins respectifs » (Bureau international du Travail, 2000).

Droits de l'homme et état de droit

En vertu d'un certain nombre d'instruments internationaux relatifs aux droits de l'homme,

les pays et les entreprises ont le devoir de respecter ces droits, notamment ceux menacés par la présence de produits chimiques et déchets dangereux. L'utilisation d'approches fondées sur les droits de l'homme complète et appuie les mesures législatives et réglementaires en garantissant la protection et l'accès à des recours utiles. Certaines entreprises de l'industrie chimique, à l'exemple de BASF et de Merck, ont signé les Principes directeurs des Nations Unies relatifs aux entreprises et aux droits de l'homme.

Pour une analyse détaillée de ce sujet, se reporter au chapitre 8 de la partie IV du rapport GCO II.

5.6 Intégration de la chimie verte et durable dans la gouvernance d'entreprise

La cible 12.6 des ODD encourage expressément les entreprises, en particulier les grandes entreprises et les sociétés transnationales, à adopter des pratiques durables et à intégrer des informations sur le développement durable dans leurs rapports périodiques (Gouvernement des États-Unis, n.d.). Un cadre d'indicateurs a été élaboré pour mesurer les progrès (Conférence des Nations Unies sur le commerce et le développement, 2019). Conformément à la cible 12.6 des ODD, un nombre croissant de détaillants, de fabricants et d'entreprises du secteur chimique ont intégré des objectifs et des mesures de durabilité, tels que la gestion durable de la chaîne d'approvisionnement ou la responsabilité élargie des producteurs, dans leur cadre de gouvernance d'entreprise.

Les mesures de durabilité les plus pertinentes que peuvent adopter les entreprises pour promouvoir l'innovation dans le domaine de la chimie verte et durable sont notamment les suivantes :

renforcement de l'élaboration volontaire de normes allant au-delà des obligations pour les produits chimiques dont les émissions sont préoccupantes ; harmonisation des protocoles de gestion des produits chimiques dans tous les secteurs de l'industrie (par ex., divulgation complète des matériaux et étiquetage des produits) ; utilisation d'outils d'analyse du cycle de vie, d'indicateurs et de systèmes de communication d'informations pour résoudre le problème de la toxicité et de la viabilité des produits tout au long de leur cycle de vie ; et obligation systématique de concevoir des produits et procédés de production plus sûrs et plus durables. Les entités gouvernementales, notamment celles qui s'occupent de questions en rapport avec l'innovation industrielle, la compétitivité des entreprises et le commerce, pourraient mieux faire connaître ces initiatives grâce aux programmes et structures dont elles disposent, ainsi qu'aux politiques et programmes sectoriels de facilitation présentés au chapitre 6.

6

SECTEURS ET PROGRAMMES PORTEURS POUR LA PROGRESSION VERS LA CHIMIE VERTE ET DURABLE >

6.1	Rôle des secteurs et programmes porteurs dans la promotion de la chimie verte et durable	74
6.2	Enseignement de la chimie verte et durable	75
6.3	Recherche et innovation dans le domaine de la chimie verte et durable	76
6.4	Incitations financières et modèles commerciaux	81

6.1 Rôle des secteurs et programmes porteurs dans la promotion de la chimie verte et durable

Alors que le chapitre 5 a permis de passer en revue les possibilités en matière d'outils, d'instruments et de politiques utiles pour progresser sur la voie de la chimie verte et durable, le chapitre 6 étend l'examen aux secteurs, programmes et approches de facilitation à caractère plus stratégique. Il s'intéresse, en premier lieu, à l'enseignement, à la recherche et à l'innovation en matière de chimie verte et durable, ainsi qu'aux modèles commerciaux et mécanismes de financement facilitateurs. Jusqu'à présent, bon nombre de ces domaines ne prenaient pas directement en considération le programme de la chimie verte et durable. La difficulté consiste donc à mettre en évidence les liens utiles qui peuvent exister et à engager des actions afin de veiller à ce que les secteurs et programmes concernés puissent concourir à la promotion de la chimie verte et durable.

6.2 Enseignement de la chimie verte et durable

L'intensification des efforts déployés en faveur de la recherche, de l'innovation et du développement de produits durables dans le domaine de la chimie nécessite l'émergence d'une nouvelle génération de chimistes et d'ingénieurs dotés des compétences nécessaires pour agir dans ce sens. Les moyens pédagogiques formels, informels et autres, ainsi que l'éducation d'un plus large éventail de parties prenantes et du grand public, peuvent se révéler utiles à cet égard. Un manuel spécialisé traitant de ce sujet sera publié par le PNUE dans le courant de l'année 2021.

La réforme des programmes pédagogiques passe avant tout par l'intégration de la toxicologie, de la chimie verte et durable, et des thèmes connexes du Programme de développement durable à l'horizon 2030 dans les programmes scolaires de l'enseignement primaire, secondaire et supérieur et des écoles professionnelles. Par exemple, le Ministère indien de l'éducation pilote un programme dans le cadre duquel tous les chimistes suivent un cours d'un an en chimie verte (PNUE, 2019b). L'initiative mondiale pour la chimie verte lancée par l'ONUDI et le Centre pour une chimie

verte et une ingénierie verte de l'Université Yale s'articule autour d'un programme éducatif qui vise à développer les connaissances et les capacités en matière de chimie verte dans le monde entier, et met gratuitement à disposition des ressources pédagogiques. Des activités pilotes ont été menées en Afrique du Sud, au Brésil, en Colombie, en Égypte, en Serbie et au Sri Lanka (Université Yale, n.d.). Au nombre des cours professionnels sur la chimie verte et durable, on peut citer, à titre d'exemple, le cours en ligne proposé par l'Université fédérale de São Carlos (Brésil), et l'université d'été proposée par l'Université Leuphana (Allemagne). Ces initiatives peuvent inciter d'autres pays et organisations à intensifier leurs efforts.

Grâce à ces activités, entre autres, des outils et supports pédagogiques sur la chimie verte et durable sont disponibles et utilisables aux niveaux primaire, secondaire, tertiaire et professionnel. Toutefois, de nouvelles actions s'imposent pour diffuser les meilleures pratiques et surmonter les obstacles à la transition vers la chimie verte et durable qui existent dans les milieux universitaires et le secteur privé. Les réseaux nationaux, régionaux

Encadré 6.1: Chimie verte et durabilité dans les cours d'éducation et de formation professionnelles : étude de cas portant sur le Brésil (PNUE, 2019b)

Le Service national de formation industrielle (SENAI), organisé et dirigé par les entrepreneurs industriels par l'intermédiaire de la Confédération nationale de l'industrie et des fédérations d'État, a été créé afin de former des travailleurs qualifiés pour l'industrie brésilienne. Il opère en collaboration avec le Ministère des relations extérieures dans les pays suivants : Cap-Vert, Guatemala, Guinée-Bissau, Jamaïque, Mozambique, Paraguay, Pérou, Timor oriental et São Tomé-et-Principe. En 2015 a été créé au Brésil l'Institut de chimie verte du SENAI. Celui-ci entend sensibiliser le grand public à l'échelle internationale et renforcer les capacités mondiales en matière de méthodes déployables dans le domaine de la chimie verte, en vue de concevoir des produits et des procédés qui auront des effets positifs sur l'environnement mondial tout au long de leur cycle de vie. Sous l'égide de l'initiative pour la chimie verte lancée par l'ONUDI, un projet pilote mené au Brésil permettra de démontrer que la chimie verte se prête à des applications à grande échelle dans le domaine de la production de plastiques biosourcés. D'autres études se pencheront sur la promotion des applications technologiques de la chimie verte et de l'ingénierie verte dans les pays en développement et les pays à économie en transition (Université Yale, n.d.).

et mondiaux existants peuvent servir à diffuser les meilleures pratiques et mettre en commun les enseignements tirés. La chimie verte et durable devrait également être ancrée dans des actions plus vastes visant à intégrer la durabilité dans l'éducation, telles que l'initiative sur l'éducation

durable de l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture.

Pour une analyse détaillée de ce sujet, se reporter au chapitre 2 de la partie IV du rapport GCO II.

6.3 Recherche et innovation dans le domaine de la chimie verte et durable

L'écosystème de l'innovation chimique et ses acteurs clefs

L'accélération de la recherche et de l'innovation dans le cadre d'une démarche collaborative et facilitatrice, faisant notamment intervenir les start-up, est déterminante pour bénéficier des avantages promis par la chimie verte et durable et contribuer ainsi à la réalisation du Programme de développement durable à l'horizon 2030. La recherche et l'innovation pertinentes dans le domaine de la chimie s'inscrivent dans un écosystème d'innovation plus étendu qui associe divers acteurs entretenant des relations complexes (Jackson, 2011), comme le montre la Figure 6.1. Les instituts nationaux de recherche et de technologie, les organismes de développement économique et les programmes de promotion du commerce peuvent soutenir les activités pertinentes de collaboration nationale et internationale.

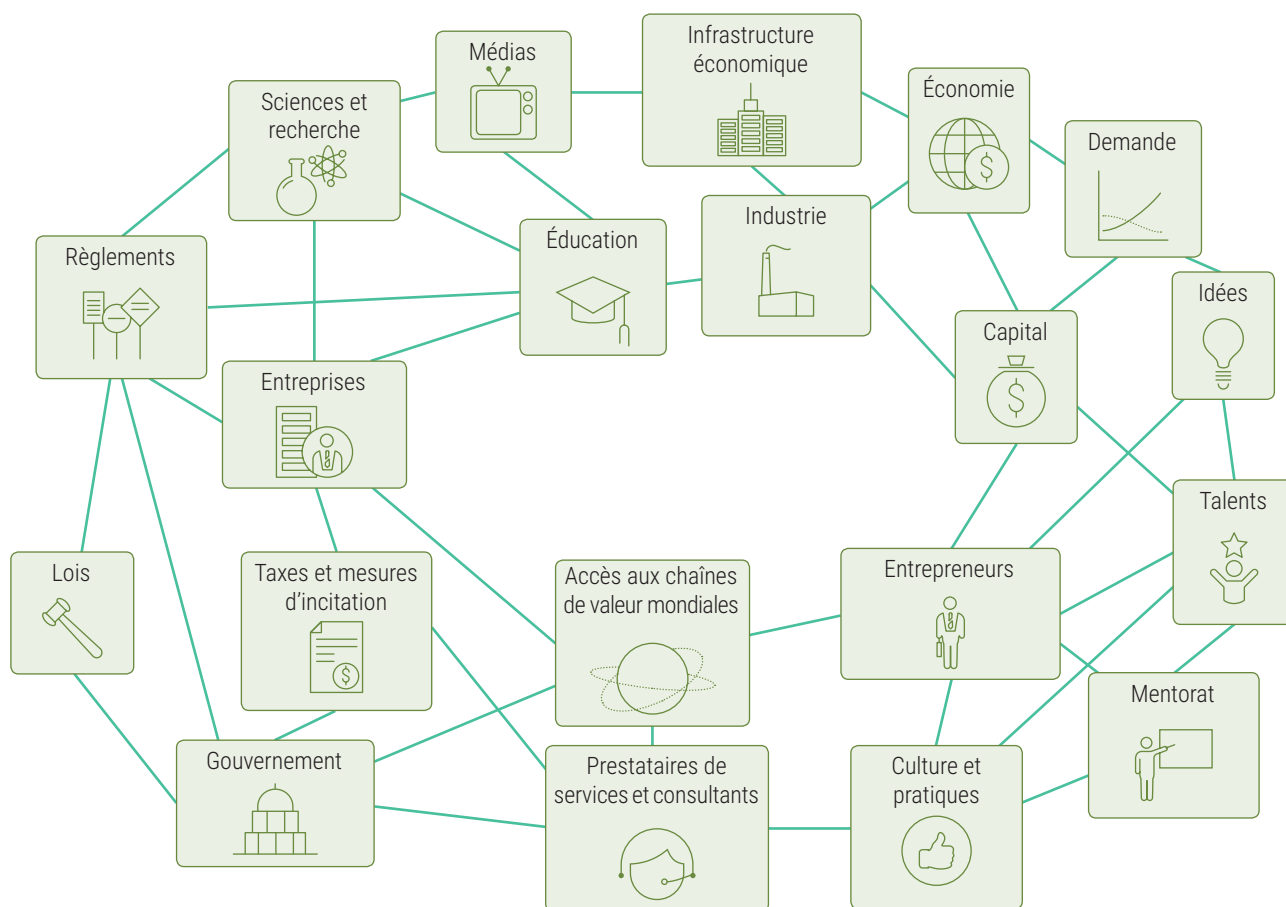
Universités

Depuis toujours, les universités axent leur travail sur l'enseignement et la recherche fondamentale, mais compte tenu des pressions en faveur de la recherche pratique et appliquée, elles s'investissent de plus en plus dans des activités entrepreneuriales et commerciales (Etzkowitz *et al.*, 2008). Autrement dit, elles deviennent non seulement des solutionneurs de problèmes, des inventeurs et des entrepreneurs (CE et OCDE, 2012), mais aussi des acteurs importants du paysage de l'innovation

en matière de chimie verte et durable. Comme exemples d'activités universitaires pertinentes, on peut citer le brevetage d'innovations ou l'octroi de licences pour celles-ci, et la mise en place de systèmes de soutien aux start-up, qui peuvent notamment donner naissance à des entreprises dérivées (Klofsten et Jones-Evans, 2000). La formation des jeunes chercheurs est essentielle pour assurer la viabilité des start-up sur le long terme. Pour lever les contraintes pesant sur les programmes d'enseignement et créer ainsi des conditions propices à la création de nouvelles entreprises, il est primordial de tisser des liens entre les groupes de recherche, les programmes d'enseignement et l'industrie afin de favoriser le développement d'entreprises orientées vers la chimie verte et durable (Ocampo-López *et al.*, 2019).

Start-up

Les start-up et les jeunes entrepreneurs s'imposent de plus en plus comme des acteurs majeurs de l'exploitation du plein potentiel de la chimie verte et durable. Elles contribuent grandement à l'innovation et à la création d'emplois et de richesses (FEM, 2018). Elles investissent d'importantes ressources dans la recherche-développement et favorisent le transfert de technologies entre les régions et les chaînes de valeur en faisant appel à la coopération internationale (Oviatt et McDougall, 2005). Dans les économies en développement et les économies émergentes, elles sont toutefois confrontées à des défis particuliers, dont le manque d'infrastructures

Figure 6.1: **Modèle de l'écosystème de l'innovation** (d'après Ryzhonkov, 2013)

élémentaires de laboratoire et d'accès aux capitaux (PNUE, 2017b).

Pour leur permettre de pleinement réaliser leur potentiel, il importe de les soutenir par des mesures diverses : mise en place de bureaux d'innovation technologique dans les universités, création d'environnements favorables aux start-up dans les incubateurs et les accélérateurs, ou encore intégration d'aspects liés à la chimie durable dans les obligations vertes, en particulier celles se rapportant à l'atténuation des changements climatiques. Ces initiatives pourraient contribuer à aligner leurs travaux de recherche en matière de chimie sur les objectifs de la chimie verte et durable, en les encourageant à prendre en compte les principes directeurs de la chimie verte et durable et en utilisant ces principes dans le cadre des procédures de sélection.

Petites et moyennes entreprises (PME)

Les petites et moyennes entreprises (PME) jouent un rôle majeur dans la plupart des économies, en particulier dans les pays en développement. Elles forment la majorité des entreprises dans le monde et contribuent de manière importante à la création d'emplois et au développement économique mondial. À l'échelle du globe, elles représentent environ 90 % du tissu entrepreneurial et plus de 50 % des emplois (Groupe de la Banque mondiale, 2020). Leur adaptabilité et leur souplesse leur permettent de faire une large place à l'éco-innovation. Elles pourraient constituer un levier essentiel d'une économie peu gourmande en ressources (Bisgaard et Tuck, 2014). Étant donné que de nombreuses PME se heurtent à des contraintes en matière de ressources, en particulier dans le cadre de la recherche et de l'innovation, les mesures de soutien, telles que celles proposées pour les start-up, sont importantes pour amener

les PME à s'investir davantage dans l'innovation en matière de chimie verte et durable. En outre, des programmes de soutien sur le plan pratique visant à encourager l'utilisation de substances chimiques plus sûres pourraient être mis en place. L'Occupational Safety and Health Administration (administration de la prévention des maladies professionnelles et des accidents du travail, US OSHA) des États-Unis, par exemple, a créé un site web intitulé « Transitioning to Safer Chemicals » (passage à des substances chimiques plus sûres) et un programme de renforcement des capacités pour aider les PME à opérer des choix éclairés concernant les solutions de substitution chimiques (US OSHA, n.d.).

Industrie chimique

Les entreprises du secteur chimique mènent d'importantes activités de recherche et de développement à forte intensité de capital et d'ingénierie (Whitesides, 2015). Compte tenu des coûts élevés de la recherche et de l'innovation, une collaboration étroite entre l'industrie et les milieux universitaires est en train de se mettre en place. Ces dernières années, d'importantes innovations chimiques ont été co inventées ou mises au point, notamment dans les domaines suivants : catalyse hétérogène, synthèse de monomères, chimie des produits pharmaceutiques à petites molécules, chimie organométallique, électrochimie et stockage de l'énergie (Whitesides, 2015). Le soutien direct apporté par le secteur privé aux universités est également important. Il peut, par exemple, prendre la forme d'un financement de la recherche, d'un partenariat de formation et d'un contrat de service technique (Malairaja et Zawdie, 2008).

Secteur des services financiers

Les entités financières tant publiques que privées sont des acteurs du secteur financier qui ont la capacité de modeler la durabilité de l'innovation chimique. Par entités financières publiques, on entend notamment les banques de développement nationales, régionales ou multilatérales, les organismes de crédit à l'exportation ou les entreprises étatiques et de services publics.

Les entités et sources de financement privées sont, par exemple, les fonds de pension, les fonds souverains, les fonds communs de placement, les compagnies d'assurance, les fonds spéculatifs, les banques et les dépenses d'investissement des entreprises. Le secteur des assurances, en tant qu'investisseur majeur, peut également faire en sorte que ses investissements contribuent à l'innovation dans le domaine de la chimie verte et durable. Dans le secteur bancaire, les décisions de prêt peuvent orienter les investissements vers des projets et des technologies durables. Les investisseurs institutionnels peuvent user de leur influence en faveur de l'adoption de pratiques plus durables par les entreprises et, en tant qu'actionnaires, exiger qu'elles agissent dans un esprit de durabilité (PNUE, 2019b).

Gouvernement

Les gouvernements ont un important rôle de catalyseur à jouer dans la promotion de l'innovation chimique, en contribuant à remédier aux déficiences du marché pour susciter des innovations (Commission économique des Nations Unies pour l'Europe [CEE-ONU], 2012). Ils peuvent, par exemple, prévoir des incitations financières, financer des infrastructures ou financer directement des projets d'innovation (Lopes da Silva, Baptista Narcizo et Cardoso, 2012). Ils peuvent également faire en sorte que les obstacles à l'innovation soient levés (ONU, 2017). Ils contribuent au premier chef à amener les principaux secteurs et les parties prenantes à œuvrer ensemble pour servir l'intérêt public.

Parmi les stratégies de facilitation que les gouvernements pourraient mettre en œuvre, on peut citer l'élaboration de politiques ou de programmes industriels nationaux favorisant l'innovation dans le domaine de la chimie verte et durable. De telles initiatives cadrent bien avec le rôle qui leur incombe de mettre au point des instruments de facilitation et de créer des conditions favorables, plutôt que d'opérer des choix précis (CEE-ONU, 2012). Le Gouvernement de l'Ontario (Canada), par exemple, a investi plus de 16 millions de dollars pour aider à la création du GreenCentre, qui soutient la recherche-développement précommerciale dans le domaine

de la chimie verte afin de contribuer à la durabilité, à la prospérité et à la santé des communautés, ainsi qu'à la création d'emplois de qualité et à l'amélioration des conditions de vie de tous les Ontariens (GreenCentre Canada, 2020).

Autres acteurs importants

Les ONG, les associations de travailleurs et d'employeurs, et le grand public ne mènent généralement pas de travaux de recherche en chimie, mais jouent pourtant un rôle important dans le processus d'innovation. Par exemple, des dialogues axés sur l'innovation peuvent être engagés entre parties prenantes en vue d'élaborer des cadres réglementaires favorables à celle-ci. Cette approche nécessite de mettre en place de nouveaux mécanismes d'interaction mais peut grandement contribuer à la promotion de l'innovation dans le domaine de la chimie verte et durable en vue de la réalisation des ODD (FEM, 2018). Le rôle des ONG et des associations de travailleurs est particulièrement important, s'agissant de rendre les entreprises responsables de leurs actes. Le lancement de campagnes axées sur les marchés, en marge d'une action réglementaire, peut contribuer dans une large mesure à la promotion de l'innovation dans le domaine de la chimie verte et durable.

Autres mesures constructives et éléments à prendre en considération

Articulation entre la recherche et les besoins en matière de développement

Le Programme de développement durable à l'horizon 2030 offre un cadre très utile pour orienter les futurs travaux de recherche sur la chimie verte et durable et façonner, idéalement dans le même temps, les programmes de recherche des acteurs publics et privés. La plateforme SusChem, par exemple, est un forum auquel sont conviés l'industrie, les milieux universitaires, les décideurs et la société en général pour établir les priorités de recherche directement liées au Programme 2030

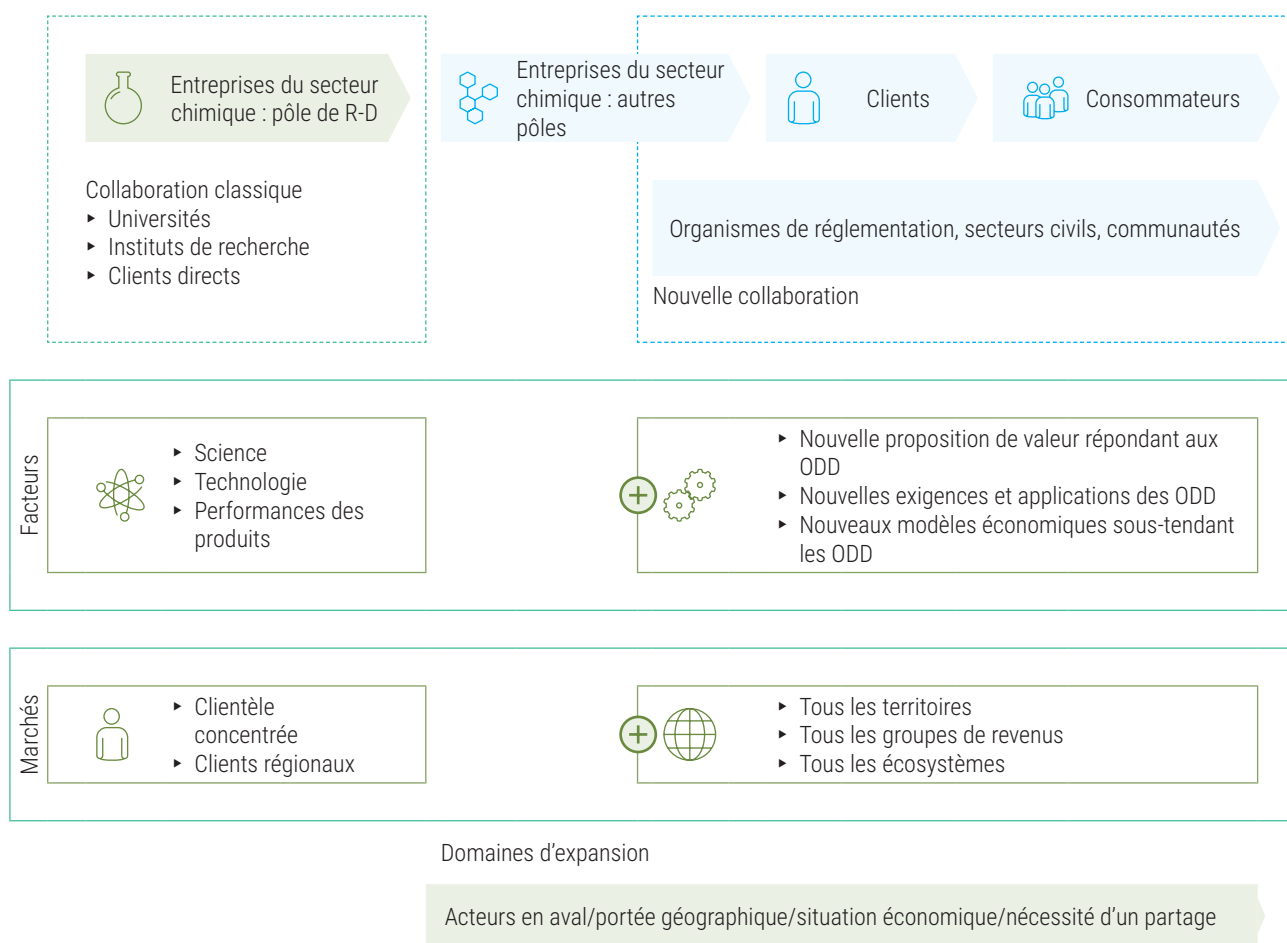
(SusChem, 2019). Pour promouvoir les innovations au service de la durabilité, les acteurs impliqués dans l'innovation chimique peuvent prendre en considération les objectifs et principes directeurs de la chimie verte et durable présentés au chapitre 3. Par exemple, les incubateurs et accélérateurs de start-up, ainsi que les mécanismes de financement de ces jeunes entreprises pourraient intégrer les objectifs de la chimie verte et durable dans leur procédure de sélection, en particulier si les travaux de recherche sont cofinancés par des entités publiques.

Renforcement de l'innovation collaborative

Les mécanismes d'innovation collaborative se sont révélés efficaces pour orienter la recherche et l'innovation vers des questions de durabilité d'une manière qui mobilise toutes sortes de parties prenantes et répond à leurs besoins. Des formes nouvelles et innovantes de collaboration se mettent en place au sein des entreprises du secteur chimique, ainsi qu'entre les entreprises du secteur chimique et des entités externes, comme les clients et les consommateurs, les organismes de réglementation et les organisations de la société civile. Un des exemples que l'on peut citer et qui a permis de tirer des enseignements précieux est le défi de l'innovation collaborative lancé par le Conseil de la chimie et du commerce verts et axé sur les conservateurs sûrs et efficaces pouvant être ajoutés aux produits de consommation (Becker et Tickner, 2020).

Les partenariats sont souvent axés sur les ODD et sont mis en œuvre en tenant compte des marchés intersectoriels, mondiaux et diversifiés (FEM, 2018). Dans le secteur des textiles, par exemple, l'innovation collaborative peut associer l'industrie chimique, les start-up du secteur de la chimie, les concepteurs, les utilisateurs finaux potentiels, les instituts de recherche et les investisseurs éventuels. Les gouvernements et les autres parties prenantes peuvent favoriser la mise en œuvre d'une collaboration de ce type et encourager la formation de consortiums en élaborant des politiques d'innovation, des systèmes de subventions ou des programmes technologiques pertinents.

Figure 6.2: **Nouvelles formes de collaboration dans l'industrie chimique** (d'après le FEM, 2018)



Renforcement des organes soupçieux d'articuler science et politique

Un certain nombre d'organes et de mécanismes nationaux et internationaux rassemblant des scientifiques et des décideurs ont été mis en place afin de veiller à ce que l'élaboration des politiques soit étayée par les plus récentes données scientifiques probantes. Ces organes peuvent contribuer dans une large mesure à stimuler l'innovation dans le domaine de la chimie verte et durable. Au niveau international, le Comité

d'étude des polluants organiques persistants de la Convention de Stockholm examine les propositions d'inscription de nouvelles substances formulées par les Parties, évalue les mesures de réglementation envisageables en tenant compte des incidences socioéconomiques et émet des recommandations en vue de l'inscription. Autre exemple, le Comité d'étude des produits chimiques de la Convention de Rotterdam qui, entre autres fonctions, examine les propositions d'inscription de préparations pesticides extrêmement dangereuses.

6.4 Incitations financières et modèles commerciaux

Instrument de marché

Le recours à des instruments de marché peut compléter de manière efficace les approches réglementaires visant à promouvoir l'innovation dans le domaine de la chimie verte et durable. Parmi les mesures envisageables figurent l'application d'une taxation différentielle des produits chimiques dangereux, s'appuyant sur les enseignements tirés du récent système de taxation en fonction du danger et des risques, ou de redevances d'utilisation visant à accélérer l'élimination progressive des substances extrêmement préoccupantes.

Les programmes de financement sont tout aussi importants. Les obligations vertes, par exemple, sont des « titre[s] de créance émis pour lever des capitaux spécifiquement destinés à des projets liés au climat ou à l'environnement » (Banque internationale pour la reconstruction et le développement et Banque mondiale, 2017). Les obligations vertes conçues pour encourager la durabilité sont assorties de mesures d'incitation fiscale telles que des exonérations et des crédits d'impôt, ce qui les rend plus attractives que les obligations imposables comparables. Si les obligations vertes se concentrent à l'heure actuelle sur les changements climatiques (Ernst & Young, 2016), leur potentiel en matière de promotion de l'investissement et de l'innovation dans le domaine de la chimie durable pourrait également être exploité.

Les programmes de financement sont tout aussi importants. Les obligations vertes, par exemple, sont des « titre[s] de créance émis pour lever des capitaux spécifiquement destinés à des projets liés au climat ou à l'environnement » (Banque internationale pour la reconstruction et le développement et Banque mondiale, 2017). Les obligations vertes conçues pour encourager la durabilité sont assorties de mesures d'incitation

fiscale telles que des exonérations et des crédits d'impôt, ce qui les rend plus attractives que les obligations imposables comparables. Si les obligations vertes se concentrent à l'heure actuelle sur les changements climatiques (Ernst & Young, 2016), leur potentiel en matière de promotion de l'investissement et de l'innovation dans le domaine de la chimie durable pourrait également être exploité.

Modèles commerciaux durables

Les modèles commerciaux résolument axés sur la durabilité et la circularité imposent à une entreprise de repenser ses produits et ses procédés. Cela passe notamment par la rationalisation de l'utilisation des ressources, la réduction de l'utilisation de substances chimiques préoccupantes et l'atténuation des effets de ses produits et procédés, y compris en fin de vie (par ex., réduction des déchets). L'ouverture du processus de conception des produits et la mobilisation des parties prenantes tout au long de la chaîne de valeur peuvent contribuer à répondre aux préoccupations de durabilité dès le départ.

L'éco-innovation, basée sur une réflexion sur le cycle de vie, aide les entreprises, en particulier les PME, à adopter des modèles commerciaux durables. Elles peuvent ainsi accéder à de nouveaux marchés en expansion, accroître leur rentabilité tout au long de la chaîne de valeur et garder une longueur d'avance sur les réglementations et les normes, tout en rationalisant l'utilisation des ressources, notamment en ce qui concerne l'utilisation de produits chimiques préoccupants (Bisgaard et Tuck, 2014). Il devient ainsi possible de proposer des produits durables innovants, d'améliorer les procédés, de mettre en place des systèmes de régénération des déchets et de passer à des modèles serviciels, tels que le leasing chimique.

Tableau 6.1: **Types d'instruments de marché et exemples de leur application à la gestion des produits chimiques** (d'après Stavins, 2001 ; Sterner et Coria 2011 ; OCDE, n.d.)

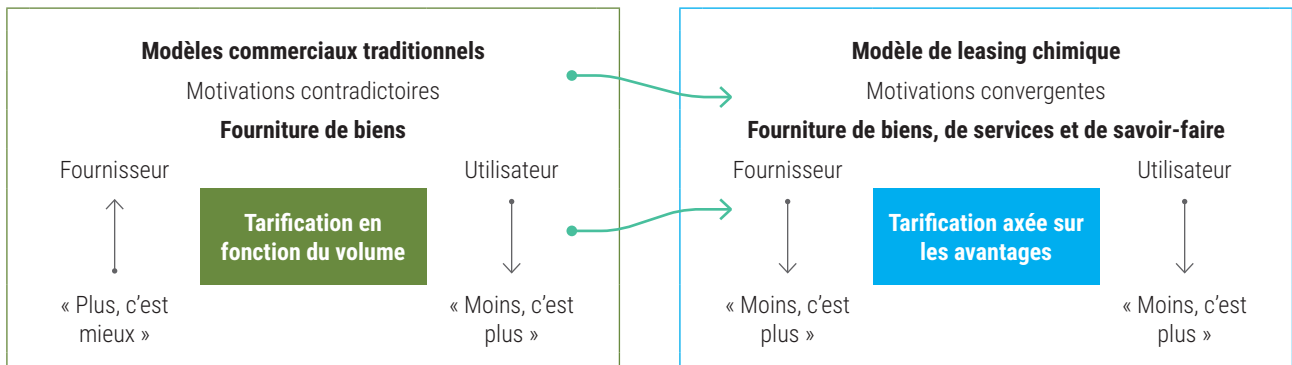
Instrument stratégique	Description	Exemple d'application
Taxe	En augmentant le prix d'utilisation d'un produit chimique, une taxe incite à en diminuer l'utilisation. Elle est généralement prélevée par l'État et les recettes fiscales sont versées au budget général. Le niveau d'imposition doit correspondre aux dommages causés par la production, l'utilisation et/ou l'élimination du produit chimique, qui, en l'absence de la taxe, ne seraient pas reflétés dans le prix du marché.	Pesticides ; engrais inorganiques ; solvants chlorés ; batteries
Redevance/Droit	Semblable à une taxe, mais les recettes sont généralement réservées pour un emploi déterminé. Le niveau d'une redevance doit refléter le coût de la prestation d'un service spécifique, à l'exemple du traitement des déchets dangereux.	Déchets dangereux ; pesticides ; conteneurs de pesticides ou de produits chimiques ; pneus ; batteries
Subvention	La subvention est le pendant exact de la taxation. Elle a pour effet d'inciter au recours accru à des produits chimiques de substitution moins dangereux. En particulier, les autorités pourraient souhaiter subventionner l'apprentissage et le développement technologique.	Subventions en faveur de l'agriculture biologique ; élimination des peintures au plomb
Suppression des subventions	Dans de nombreux cas, les subventions sont utilisées sans accorder suffisamment d'attention à leur répartition, ce qui peut donner lieu à des pratiques non rationnelles d'un point de vue sanitaire ou environnemental. Par conséquent, la suppression des subventions est considérée comme un instrument stratégique à part entière.	Suppression des subventions pour l'utilisation d'engrais chimiques ou de pesticides
Système de consigne	Une surtaxe est payée pour tout achat de produits potentiellement polluants. Un remboursement est effectué lorsque le produit est retourné dans un centre agréé, que ce soit pour recyclage ou pour élimination.	Récipients d'emballage de pesticides ou de produits chimiques ; batteries ; pneus
Permis négociables	Un niveau global de pollution « admissible » est défini et réparti entre les entreprises sous forme de permis. Ces permis peuvent être échangés sur les marchés aux tarifs qui y sont pratiqués.	Essence au plomb (négociations entre raffineries) ; substances appauvrissant la couche d'ozone (négociations entre producteurs et importateurs)

Dans le cadre du modèle de leasing chimique, les fournisseurs vendent des services (par ex. peinture d'un certain nombre de voitures) plutôt que des produits chimiques, ce qui incite à réduire autant que possible le recours à ces derniers et à optimiser l'utilisation des ressources (ONU, 2017). Un exemple de réussite en est la Colombie, où l'introduction d'un système de leasing chimique pour le traitement des eaux dans l'industrie pétrolière a permis de réduire

de 20 % la consommation de produits chimiques, tout en diminuant de 80 % le coût du traitement. Au niveau international, la Déclaration d'intention de 2016 sur le leasing chimique a été signée par l'Allemagne, l'Autriche, El Salvador, la Serbie, le Sri Lanka et la Suisse.

Pour une analyse détaillée de ce sujet, se reporter aux chapitres 5 et 6 de la partie IV du rapport GCO-II

Figure 6.3: **Comparaison entre les modèles commerciaux traditionnels et le leasing chimique** (d'après Joas, Abraham et Joas, 2018, p. 398)



Reproduction avec l'autorisation de Springer Nature ; autorisation transmise par le Copyright Clearance Center, Inc.



CRITÈRES MESURABLES ET MÉCANISMES DE COMMUNICATION D'INFORMATIONS PERMETTANT DE PROMOUVOIR LA CHIMIE VERTE ET DURABLE >

- | | | |
|-----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 7.1 | Rôle des critères mesurables et des mécanismes de communication d'informations dans la promotion de la chimie verte et durable | 83 |
| 7.2 | Critères mesurables en matière de chimie verte et durable | 86 |
| 7.3 | Évaluation de la durabilité et mécanismes de communication d'informations en la matière | 87 |

7.1 Rôle des critères mesurables et des mécanismes de communication d'informations dans la promotion de la chimie verte et durable

L'observation formulée par Peter Ducker selon laquelle on ne peut améliorer que ce qu'on peut mesurer est fréquemment citée dans les ouvrages de gestion. Ce concept s'appuie sur le raisonnement selon lequel en l'absence de critères mesurables solides, il est difficile de quantifier les progrès et de procéder à des ajustements visant à produire le résultat escompté. Le présent chapitre passe en revue les critères mesurables et les mécanismes de communication d'informations à l'appui de l'objectif de promotion de la chimie verte et durable. Si certains d'entre eux se rapportent directement à la chimie verte et durable, d'autres couvrent des sujets plus généraux liés à la durabilité. Pour ces derniers, il pourrait être utile de se pencher plus avant sur l'ajustement des critères mesurables et des mécanismes de communication d'informations concernés en vue de favoriser l'innovation dans le domaine de la chimie verte et durable.

7.2 Critères mesurables en matière de chimie verte et durable

Évaluation et analyse des dangers

Le danger chimique désigne la propriété intrinsèque d'une substance chimique de provoquer des effets néfastes sur la santé humaine et l'environnement. Parmi les exemples de propriétés dangereuses, on peut citer la toxicité aiguë ; la corrosivité ; la capacité de provoquer des allergies ; les effets à long terme sur la reproduction, le développement et d'autres systèmes du corps humain ; ou la persistance dans les milieux environnementaux (PNUE, 2019). Le Système général harmonisé de classification et d'étiquetage des produits chimiques fournit un ensemble de critères à appliquer pour évaluer plus facilement les dangers chimiques. De nombreux outils permettent d'aider les entreprises à répertorier ces dangers

et à trouver des produits chimiques plus sûrs et plus écologiques. GreenScreen®, par exemple, est un outil qui recense les substances chimiques dangereuses et les solutions de substitution plus sûres (GreenScreen, 2020). Pour assurer véritablement la fiabilité de ces outils, il est important de permettre la compréhension de leur fonctionnement, ainsi que des critères qu'ils appliquent pour analyser et répertorier les substances chimiques dangereuses et les solutions de substitution plus sûres. On trouvera une vue d'ensemble et un examen des outils pertinents dans Gauthier *et al.* (2014) et Panko *et al.* (2017).

Pour une analyse détaillée de ce sujet, se reporter au chapitre 1 de la partie III du rapport GCO II.

Facteur environnemental (facteur E)

Le « facteur E » est un critère qui se mesure en calculant le rapport massique entre les déchets générés et le produit obtenu (Sheldon, 2017). Un facteur E de 10 signifie que 10 kg de déchets sont générés pour chaque kilogramme de produit. Plus le facteur E est faible, plus le procédé considéré est inoffensif pour l'environnement. Dans les sociétés pharmaceutiques, le facteur E pour la synthèse d'un médicament est généralement compris entre 25 et 100. Autrement dit, la fabrication d'un kilogramme de produit peut générer jusqu'à 100 kg de déchets, ce qui ouvre de vastes perspectives d'innovation dans le domaine de la chimie verte et durable.

Intensité massique du procédé (PMI)

L'intensité massique du procédé est un autre critère mesurable qui permet d'évaluer et de mesurer les progrès accomplis vers des modes de fabrication plus durables. Elle est définie comme la masse totale de matériaux nécessaires et utilisés pour obtenir une masse de produit déterminée. Les matériaux pris en compte sont notamment les réactants, les réactifs, les solvants utilisés dans le cadre de la réaction et de la purification, ainsi que les catalyseurs. Dans l'idéal, tous les matériaux

sont incorporés au produit et aucun déchet n'est généré. Les avantages de la PMI par rapport à d'autres critères mesurables, tels que le facteur E et l'économie d'atomes sont examinés dans Jimenez, Gonzalez *et al.* (2011).

Critères mesurables associés à l'empreinte chimique

La méthode de l'empreinte chimique fournit un critère quantitatif que les fabricants, les marques et les détaillants peuvent utiliser pour mesurer les progrès réalisés dans la réduction de l'utilisation de substances chimiques très préoccupantes. Il s'agit en substance d'un critère reposant sur les dangers qui est utilisé par le projet Empreinte chimique (Chemical Footprint Project [CFP]), une initiative réunissant des investisseurs, des détaillants, des institutions gouvernementales, des organisations non gouvernementales (ONG) et des organismes de soins de santé, dont le but est de favoriser une vie saine, la propreté de l'eau et de l'air, et la consommation et la production durables par le biais de la gestion efficace des substances chimiques présentes dans les produits et les chaînes d'approvisionnement. La participation repose sur le volontariat et les résultats sont consultables par tous (Rossi *et al.*, 2017).

Tableau 7.1: Efficacité de l'utilisation des ressources dans l'industrie chimique : rapport déchets générés/produits synthétisés (Sheldon, 2017)

Secteur d'activité	Tonnes par an	Facteur E (kg de déchets par kg de produit)
Raffinage du pétrole	10^6 - 10^8	< 0,1
Produits chimiques en vrac	10^4 - 10^6	< 1-5
Produits de chimie fine	10^2 - 10^4	5-50
Produits pharmaceutiques	10 - 10^3	25->100

© 2019 Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim

7.3 Évaluation de la durabilité et mécanismes de communication d'informations en la matière

The use of metrics to assess and report on Des critères mesurables sont de plus en plus utilisés pour évaluer les performances des entreprises et des producteurs de l'industrie chimique et des secteurs en aval sur le plan de la durabilité et faire rapport à ce sujet. Des critères mesurables de durabilité ont été élaborés par tout un éventail d'acteurs, notamment des institutions publiques, le secteur privé et des ONG. Les mécanismes de communication d'informations mis en place dans le cadre des accords multilatéraux sur l'environnement (AME) relatifs aux produits chimiques et aux déchets contribuent également à mesurer les progrès accomplis dans la réalisation des objectifs en matière de chimie verte et durable.

Les dispositifs de mesure et de communication d'informations existants proposent généralement toute une série de critères et d'indicateurs, mais n'intègrent pas encore systématiquement les questions spécifiques aux produits chimiques (PNUE, 2019b). Malgré tout, des progrès sont à noter. L'initiative Chemie3, par exemple, a été lancée en 2013 sous forme de partenariat entre

la fédération allemande de la chimie (VCI) et les principaux partenaires sociaux afin de faire de la durabilité un principe directeur de l'industrie chimique en Allemagne. Au cœur de ces mesures se trouve un large éventail de services d'information et d'appui ayant pour vocation de faciliter l'intégration dans les pratiques commerciales des 12 lignes directrices de la durabilité s'appliquant à l'industrie chimique et d'en évaluer la mise en œuvre (Chemie3, n.d.). Par ailleurs, les ensembles de données existants, tels que les Pollutant Release and Transfer Registries (PRTR) and the Zero Discharge of Hazardous Chemical Gateway data platform, peuvent être réutilisés pour identifier les objectifs menant à l'implémentation d'une chimie verte et durable, ainsi que pour suivre et évaluer l'impact des initiatives actuelles.

L'inclusion de la chimie verte et durable, mais aussi d'indicateurs plus larges relatifs à la gestion des produits chimiques, dans les cadres qui régissent la publication d'informations sur la durabilité permet d'acquérir une compréhension globale des activités des entreprises et de leurs

Encadré 7.1: registres des rejets et transferts de polluants

Les PRTRs sont des systèmes efficaces de collecte et de diffusion de données relatives aux rejets de substances dangereuses provenant de zones industrielles et d'autres infrastructures, ainsi que de sources d'émissions. Divers PRTRs ont été établis tels que le European pollutant release and transfer registry (E-PRTR), Registro de emisiones y transferencia de contaminantes (RETC) au Mexique ou Toxic Release Inventory (TRI) aux Etats-Unis. Ces systèmes visent à instaurer la confiance entre les communautés et l'industrie tout en autorisant les propriétaires d'installations de présenter des initiatives de prévention contre la pollution. Les pays qui ont mis en œuvre des PRTRs ont reporté les aspects positifs qu'ils ont eu à promouvoir la participation du public, un facteur clé pour sensibiliser à la chimie verte et durable. De plus, la richesse des données générées par ces instruments peut être d'avantage utilisée pour identifier systématiquement les zones spécifiques de pollution à risque où les solutions basées sur les processus de la chimie verte et durable pourraient avoir le plus grand effet immédiat possible. Les données RRTP peuvent également servir à l'évaluation continue de l'impact des processus chimiques durables ont en termes de rejets dangereux dans les communautés voisines. Le TRI est une étude de cas encourageante sur la façon dont les données sur les rejets de polluants ont été réutilisées pour identifier et évaluer les progrès des initiatives de la chimie verte.

Encadré 7.2: Norme d'information ANSI/ACS sur les produits et procédés chimiques plus verts (NSF International, n.d.)

La norme d'information sur les produits et procédés chimiques plus verts (NSF/GCI 355, publiée en 2010) définit des critères permettant de comparer les produits et les procédés chimiques. Élaborée par l'Institut national américain de normalisation (ANSI) et l'Institut de chimie verte de la Société américaine de chimie (ACS GCI), elle constitue un cadre permettant aux fabricants de produits chimiques d'élaborer un rapport détaillé et normalisé afin de fournir des informations à leurs clients tout au long de la chaîne d'approvisionnement. Ce rapport est utilisé pour évaluer les produits chimiques et les procédés de fabrication associés dans plusieurs catégories clefs, notamment : caractéristiques chimiques (c'est-à-dire propriétés physico-chimiques, effets sur la santé humaine et sur l'environnement) ; procédés chimiques (c'est-à-dire efficacité chimique et prévention des déchets, eau, énergie, teneur en carbone biosourcé, procédés et technologies de fabrication novateurs et sécurité des procédés) et responsabilité sociale (c'est-à-dire travail des enfants, travail forcé ou obligatoire et respect des lois et règlements). Il tire une partie de sa substance des principes de la chimie verte, des principes de l'ingénierie verte, de la norme ISO 14000, des initiatives mondiales d'information et de nombreux autres programmes en place.

incidences, et de mesurer les progrès réalisés dans la réduction de l'empreinte environnementale et de la pollution engendrée. À titre d'illustration, l'intérêt des investisseurs pour les performances des entreprises du secteur des produits chimiques sur le plan de la durabilité est également de plus en plus marqué. Pour le calcul de l'indice de durabilité du Dow Jones par exemple, il est demandé aux fournisseurs de produits chimiques et aux entreprises en aval de communiquer des informations sur le pourcentage de leurs produits contenant certaines substances dangereuses. Les initiatives de ce type prônent le recours à la chimie verte et durable. Elles méritent d'être davantage encouragées.

Un autre champ d'étude s'intéresse à la manière dont les cadres généraux de durabilité, tels que le Cadre de développement durable stratégique, pourraient être appliqués au domaine du cycle de vie des substances chimiques, des matériaux et des produits (Broman et Robèrt, 2017). L'analyse rétrospective normative (ou « backcasting ») à partir des principes de durabilité prend principalement appui sur la pratique d'une pensée systémique et le déploiement d'un processus prospectif afin d'évaluer et de planifier les étapes permettant de réduire l'écart entre la situation actuelle et l'état

futur souhaité (durable). Les principes de durabilité définissent les conditions fondamentales que doit respecter une société durable afin de préserver la santé des systèmes sociaux et écologiques. Dans la mesure où ceux-ci ont été élaborés à partir de l'étude scientifique des systèmes naturels et sociaux, ils offrent des critères utiles qui font office de langage commun entre les différents niveaux : substances chimiques, matériaux, produits, organisation, chaînes de valeur et grands systèmes mondiaux (The Natural Step, 2020a).

Les secteurs en aval recourent également à l'autoévaluation et à la communication d'informations, notamment dans le cadre de l'initiative ZDHC, qui veut que les taux de conformité soient désormais consultables par tous. Afin de devenir crédibles, certaines entreprises choisissent de se rapprocher d'instances externes, comme la norme de produit Cradle to Cradle et le projet Chemical Footprint. Par ailleurs, des évaluations externes indépendantes sont menées, par exemple dans le cadre de l'initiative Mind the Store fondée par une ONG.

Pour une analyse détaillée de ce sujet, se reporter au chapitre 7 de la partie IV du rapport GCO-II.



**ÉLABORATION PAR LES
PARTIES PRENANTES DE
FEUILLES DE ROUTE POUR LA**
CHIMIE VERTE ET DURABLE >

Le concept de feuille de route : un puissant outil de planification

L'approche de la feuille de route à l'appui de la planification stratégique et de la prise de décisions est utilisée depuis de nombreuses années, notamment dans le cadre de l'innovation technologique (voir, par exemple, Phaal, Farrukh et Probert, 2004). L'établissement de feuilles de route est une technique qui amène les acteurs et les parties prenantes à s'associer pour définir une vision commune et une planification à long terme pour la concrétiser. Au-delà de la vision commune dont elles permettent de se doter, les feuilles de route aident à recenser les ressources disponibles, à décrire les lacunes, à définir le plan d'action et à obtenir un financement adéquat pour combler les lacunes identifiées. Elles sont couramment utilisées dans le secteur privé, mais sont tout aussi pertinentes pour d'autres groupes de parties prenantes, y compris les organismes publics. Les feuilles de route offrent également une approche structurée qui permet de définir, d'évaluer et de promulguer des interventions visant à faire avancer les solutions technologiques. Elles constituent, par exemple, un instrument efficace de stimulation de l'innovation dans l'industrie des semi-conducteurs (Voorhees et Hutchison, 2015).

Feuilles de route dans le secteur chimique et dans les chaînes de valeur

L'approche de la feuille de route est utilisée par un certain nombre d'acteurs du secteur chimique et de la chaîne de valeur pour promouvoir les mesures visant à assurer une gestion rationnelle des produits chimiques et des déchets. Sous les auspices du Conseil mondial des entreprises pour le développement durable, par exemple, les entreprises et les associations industrielles du secteur chimique ont élaboré une feuille de route s'intéressant à la manière dont ce secteur peut contribuer à la réalisation de plusieurs ODD et de leurs cibles (WBCSD, 2018). La feuille de route de l'OMS pour les produits chimiques, adoptée en mai 2017 par l'Assemblée mondiale de la Santé, recense les actions dans lesquelles le secteur de la santé a un rôle de chef de file ou de soutien important à jouer pour faire progresser la gestion rationnelle des produits chimiques et des déchets.

Figure 8.1: **Chemical Sector Road Map** (WBCSD 2018)



La feuille de route de l'OMS est complétée par toute une série de manuels pratiques (OMS, 2020).

Des feuilles de route ont également été élaborées en adoptant une approche chaîne de valeur qui fait collaborer les différents acteurs tout au long du cycle de vie des substances chimiques et des produits. Par exemple, la feuille de route vers la bioéconomie élaborée par l'UE à l'intention de l'industrie chimique en Europe (RoadToBio 2020) met en œuvre une approche chaîne de valeur pour un large éventail de produits en vue d'accroître l'utilisation de matières premières biosourcées. L'exemple du programme VinylPlus élaboré par l'industrie européenne du PVC pour donner suite à son engagement volontaire en faveur de la durabilité (Smith et Jarisch, 2019) met en exergue la manière dont une feuille de route peut favoriser la tenue d'un dialogue structuré et l'adoption de mesures systématiques visant à mobiliser les principales parties prenantes pour résoudre les problèmes qui se posent, par exemple la création d'une boucle fermée grâce à un réseau de recyclage

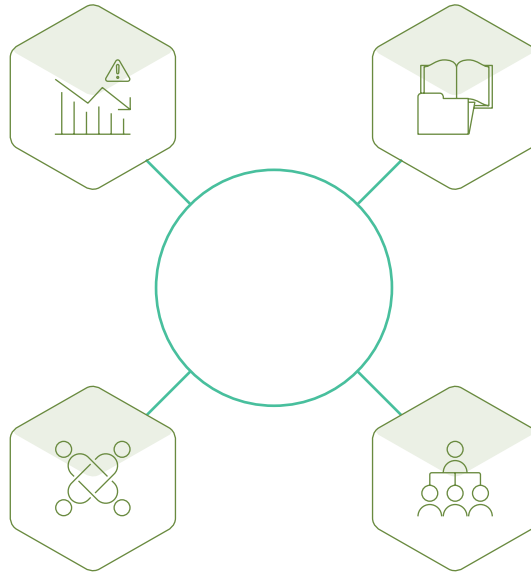
Figure 8.2: Feuille de route de l'OMS pour les produits chimiques : domaines d'action et interconnexions (OMS, 2018b, p. 3)

Réduction des risques :

La réduction des risques résulte de l'ensemble des activités prévues par la feuille de route. Certaines d'entre elles entraînent directement une réduction des risques et toutes contribuent sur le long terme à cette réduction.

Capacités institutionnelles :

Les capacités institutionnelles se constituent autour d'une base de connaissances et de données et d'une direction forte. Elles incluent des cadres législatifs et un dispositif de mise en application approprié, des politiques et des lignes directrices solides, des laboratoires, des centres antipoison, des systèmes de réponse aux situations d'urgence et une force de travail bien formée.



Connaissances et données factuelles :

Des connaissances et des données factuelles sur les produits chimiques, les vulnérabilités en termes de santé, les interventions les plus performantes, les lacunes actuelles et les priorités, etc., sont nécessaires pour guider toutes les autres interventions.

Direction et coordination :

Une direction et une coordination sont nécessaires pour s'assurer de l'intégration des actions de la feuille

de route au calendrier politique ; de leur financement approprié ; de la contribution de multiples secteurs et de l'engagement de ces actions vers des cibles nationales et internationales.

spécifique ; l'optimisation des formulations d'additifs en tenant compte de la circularité, etc. La feuille de route « Addressing Marine Plastics. A Roadmap to a Circular Economy » (« Lutter contre les plastiques dans le milieu marin : feuille de route vers une économie circulaire ») s'articule autour d'une stratégie pragmatique permettant de définir un ensemble fondamental de solutions prioritaires dont la mise en œuvre est confiée aux parties prenantes de la chaîne de valeur des plastiques sur différents horizons temporels et à différentes échelles géographiques (Wang, Talaue McManus et Xie, 2019).

Perspectives concernant l'élaboration par les parties prenantes de feuilles de route pour la chimie verte et durable

Compte tenu des avantages que peuvent présenter les feuilles de route, le rapport GCO-II a invité les différents groupes de parties prenantes à élaborer des feuilles de route impulsées par les pays et les parties concernées sur des sujets spécifiques afin d'appuyer la mise en œuvre de la

gestion rationnelle des produits chimiques et des déchets au-delà de 2020 et de faciliter le suivi des progrès à tous les niveaux, y compris au niveau mondial (PNUE, 2019b). Dans la droite ligne de cette recommandation, les différents groupes de parties prenantes pourraient élaborer des feuilles de route pour la chimie verte et durable, à titre de volets essentiels d'une action concertée, nationale et mondiale, axée sur les résultats, visant à assurer une gestion rationnelle des produits chimiques et des déchets. Ces feuilles de route pourraient être élaborées à plusieurs niveaux et en consultation avec les diverses parties prenantes, y compris les différentes administrations publiques (nationales, infranationales ou locales) ; les entreprises du secteur chimique et des secteurs en aval ; les universités et les instituts de recherche ; et les autres acteurs concernés. Ils peuvent également être élaborés autour d'une problématique particulière tels que les Solvent Management Plans (SMP) formulés par la Commission Économique pour l'Europe des Nations Unies. Il est pour cela indispensable d'insuffler un esprit d'initiative au sein des organisations concernées. L'impulsion peut venir du sommet par l'entremise

de la haute direction, ou de la base grâce à des actions individuelles menées par des personnes intéressées et engagées.

Définition des actions à mener au titre des feuilles de route pour la chimie verte et durable

Dans un premier temps, les parties prenantes souhaiteront peut-être dresser un état des lieux de leurs performances actuelles en matière de durabilité et faire l'inventaire des possibilités qui s'offrent à elles en veillant à la prise en compte des 10 objectifs et principes directeurs sous-tendant la chimie verte et durable qui sont présentés au chapitre 3. Cette analyse pourrait permettre de se doter d'une vision de l'organisation de la chimie verte et durable et faciliter le recensement des mesures d'action possibles. Par exemple :

- ▾ Les gouvernements pourraient assurer un appui spécifique aux programmes de recherche en matière d'écologie et de durabilité menés par l'industrie et la communauté des chercheurs et stimuler l'innovation au moyen de mesures réglementaires ;
- ▾ Les universités pourraient intégrer de manière systématique la chimie verte et durable dans

les programmes d'enseignement, les activités de recherche et les systèmes de soutien aux start-up ;

- ▾ Les entreprises du secteur chimique pourraient systématiquement procéder à l'analyse du cycle de vie, se fixer des objectifs en matière d'innovation en vue du remplacement de produits chimiques préoccupants et faciliter la communication au sein de la chaîne d'approvisionnement ;
- ▾ Les organisations de la société civile pourraient concourir à la diffusion des connaissances auprès des consommateurs afin de favoriser l'émergence d'une demande en faveur de substances chimiques et de produits verts et durables.

Élaboration d'une feuille de route technologique : aspects méthodologiques

Il existe toute une série d'approches méthodologiques pour faciliter l'élaboration de feuilles de route en matière d'innovation technologique. Il ressort de l'examen de différentes approches de la feuille de route que les orientations élaborées par l'Agence internationale de l'énergie peuvent constituer une

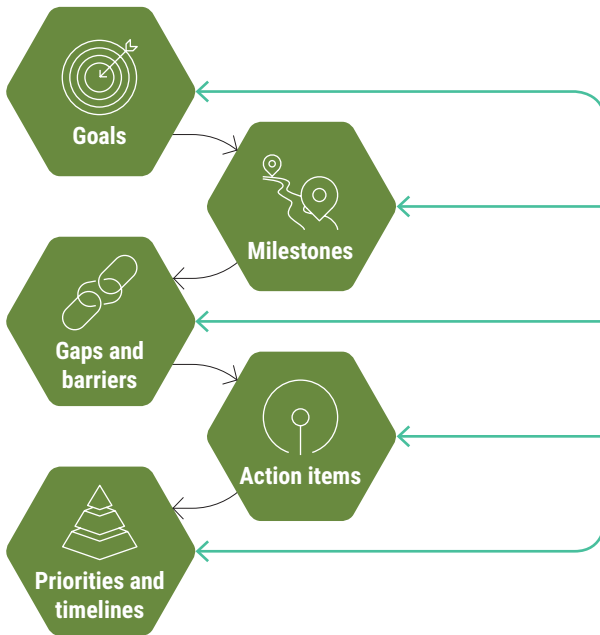
Encadré 8.1: **Projet de feuille de route de l'ACS pour l'enseignement de la chimie verte**

Le projet de feuille de route de l'ACS pour l'enseignement de la chimie verte constitue un bon exemple de mise au point d'une feuille de route axée sur la chimie verte et durable. Il formule une vision ambitieuse de l'enseignement de la chimie verte, à savoir un enseignement de la chimie qui donne aux chimistes les moyens et la motivation de relever les grands défis de la durabilité. Cette vision s'aligne sur les objectifs de développement durable des Nations Unies, dont la réalisation dépend en grande partie de la chimie (Carroll, 2019). Afin d'associer les différentes parties prenantes à l'élaboration de la feuille de route, l'ACS a adressé un questionnaire d'enquête à quelque 17 000 éducateurs.

Parmi les questions abordées dans le cadre du processus d'élaboration de la feuille de route, on peut citer, par exemple (Voorhees et Hutchison, 2015) :

- ▶ Comment les éducateurs peuvent-ils remplacer le matériel pédagogique existant par du matériel qui intègre les leçons et les principes de la chimie verte et durable dans les programmes d'enseignement de la chimie ?
- ▶ Comment les chimistes et non-chimistes qui suivent des cours de chimie dans le cadre de leur formation peuvent-ils être formés à considérer les questions relatives à la discipline de manière globale et durable sans provoquer une surcharge de travail pour les éducateurs déjà très sollicités ?
- ▶ Quelles sont les ressources déjà disponibles et quels sont les besoins à satisfaire ?

Figure 8.3: **Logique du processus à engager au titre d'une feuille de route** (AIE, 2014, p. 5)



source d'indications précieuses et d'inspiration, compte tenu notamment du fait que les secteurs de l'énergie et de la chimie font tous deux face à des défis stratégiques en matière de durabilité et de technologie. La publication intitulée « Energy Technology Roadmaps: A Guide to Development and Implementation » (Feuilles de route technologiques pour l'énergie : guide d'élaboration et de mise en œuvre) vise à fournir aux pays et aux entreprises les informations, contextuelles et autres, et les outils nécessaires pour concevoir, gérer et mettre en œuvre un processus efficace de feuille de route technologique pour l'énergie adapté à leur situation et à leurs objectifs au niveau local (AIE, 2014). Elle contient des orientations concernant l'identification des parties prenantes, l'établissement d'une base de référence technologique et l'élaboration d'indicateurs pour faciliter le suivi des progrès réalisés au regard des échéances. Ces orientations visent, en dernière analyse, à aider les parties prenantes à consacrer des ressources limitées à la définition des priorités et des actions à fort impact à court terme, tout en posant les jalons et en prenant des mesures d'amélioration à plus long terme.

Une des premières étapes d'un processus efficace de feuille de route consiste à examiner une série de questions préalables importantes, dont voici quelques exemples (d'après l'AIE, 2014) :

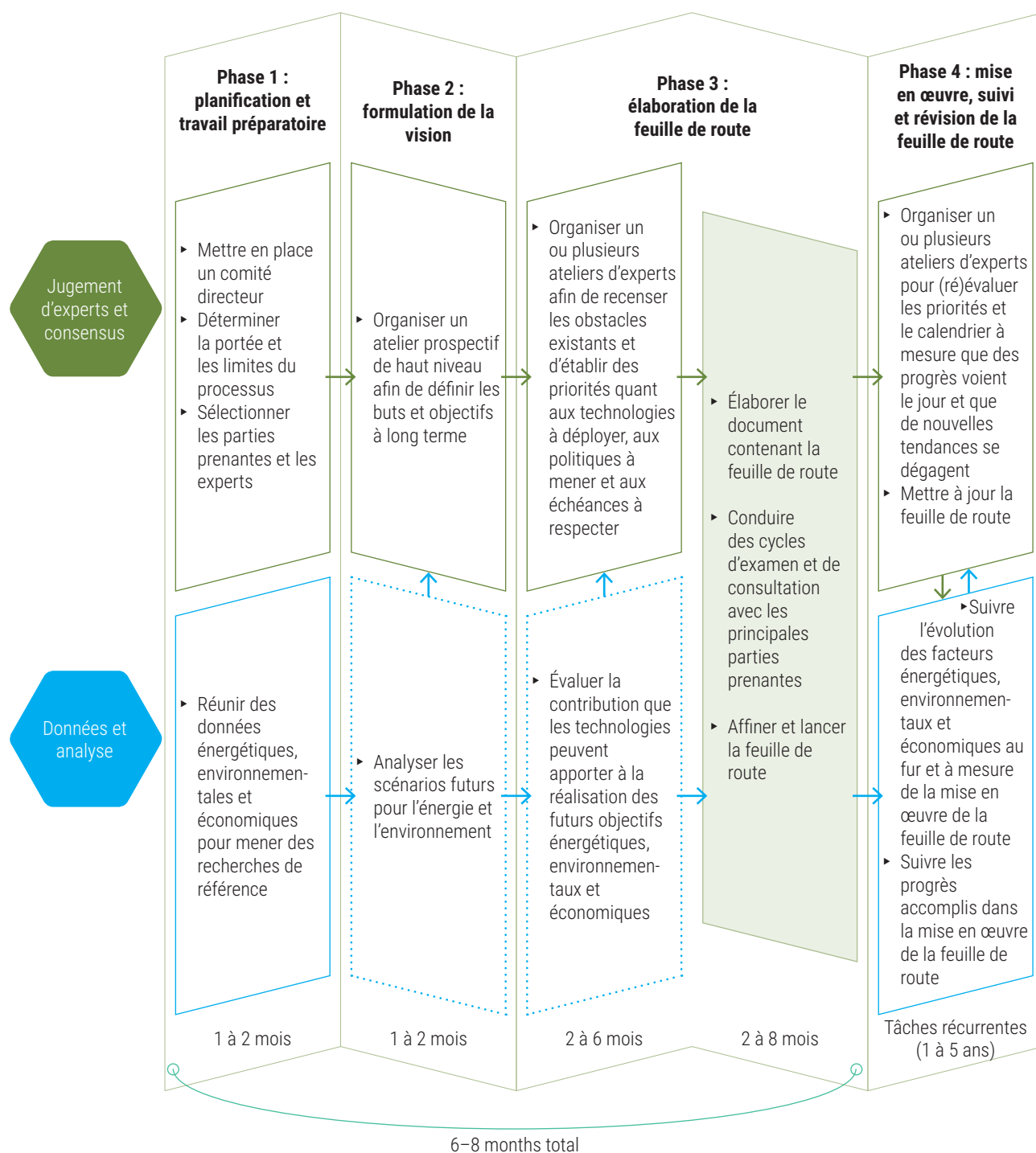
- ▼ Quel est le périmètre de l'action à mener au titre de la feuille de route ?
- ▼ Quelles sont les thématiques de la chimie verte et durable qui seront prises en considération dans la feuille de route ?
- ▼ Quels sont les experts externes et les parties prenantes à associer au processus ?
- ▼ Quel est le calendrier d'élaboration de la feuille de route ?
- ▼ Quelles sont les perspectives technologiques soumises à examen ?
- ▼ Comment l'organisme chef de file va-t-il utiliser et mettre en œuvre la feuille de route ?

La Figure 8.4 présente, à titre indicatif, le processus qui pourrait être engagé au titre d'une feuille de route dans le domaine des technologies énergétiques. Il comprend quatre étapes ainsi qu'une interface transversale entre données et analyse d'un côté et jugement d'experts et consensus de l'autre. Les quatre phases sont les suivantes : Phase 1 : planification et travail préparatoire ; Phase 2 : formulation de la vision ; Phase 3 : élaboration de la feuille de route ; et Phase 4 : mise en œuvre, suivi et révision de la feuille de route. Les parties prenantes cherchant à élaborer une feuille de route pour la chimie verte et durable souhaiteront peut-être examiner et adapter ces orientations, le cas échéant.

Laboratoires de durabilité à l'appui de l'élaboration des feuilles de route

Une des solutions envisageables pour que le processus à engager au titre de la feuille de route favorise l'écologie et la durabilité consiste à mettre en place un laboratoire de durabilité, concept qui amène les principaux acteurs et parties prenantes à s'associer pour traiter une question complexe (McCrorry *et al.*, 2020). Les laboratoires

Figure 8.4: **Processus d'élaboration d'une feuille de route technologique pour l'énergie** (AIE, 2014, p. 6)

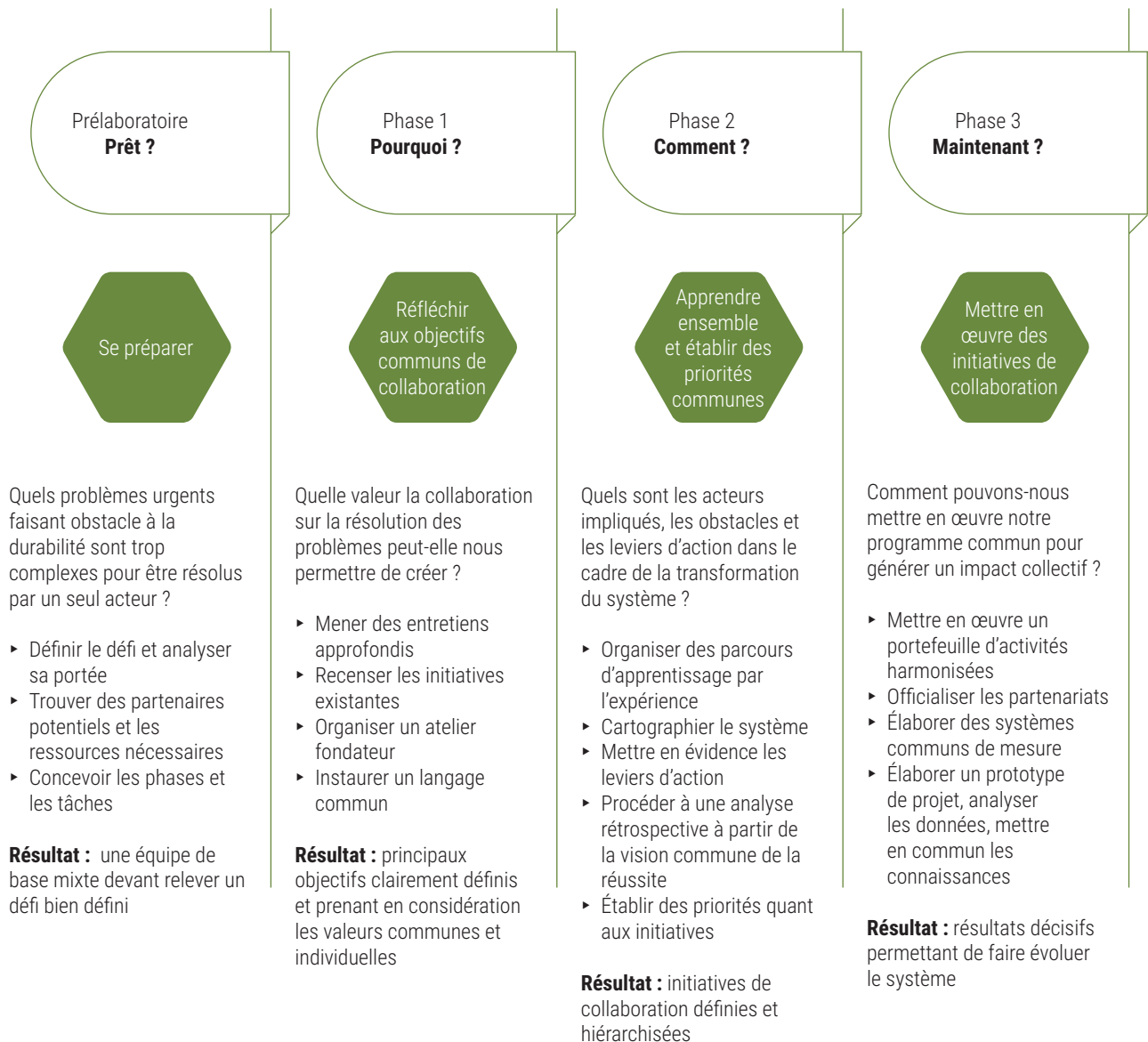


Note: les lignes pointillées indiquent les étapes facultatives, en fonction des capacités et des ressources en matière d'analyse.

de durabilité s'attachent avant tout à accorder une place centrale à la question du développement durable et à ne pas perdre de vue que la résolution des problèmes complexes qui font obstacle à la durabilité nécessite d'instaurer une collaboration sans précédent et de mettre en place de nouvelles

méthodes de travail dans tous les secteurs et à tous les niveaux. Il convient par exemple de citer le programme relatif aux laboratoires de transition vers la durabilité (Sustainability Transition Labs) coordonné par The Natural Step, qui propose à la fois une expertise dans la conception et

Figure 8.5: **Laboratoires de transition vers la durabilité » mis en place par The Natural Step** (The Natural Step Canada, n.d.)



l'engagement de réformes profondes en faveur de la durabilité et des approches de collaboration multipartite (The Natural Step, 2020b).

Le moment est venu de lancer une action stratégique de promotion de la chimie verte et durable

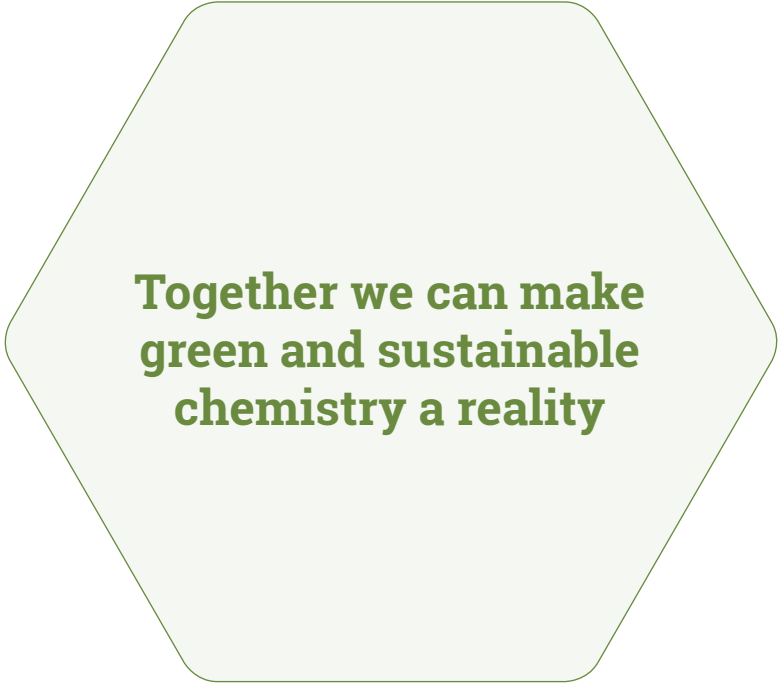
Les tendances et les perspectives décrites dans le présent manuel-cadre pointent toutes dans la même direction, à savoir : la promotion de la chimie verte et durable offre de nombreux avantages sur les plans environnemental, social

et économique. L'impulsion donnée à tous les niveaux reste toutefois insuffisante pour permettre d'exploiter pleinement le potentiel de la chimie verte et durable. L'introduction de cette thématique dans l'instrument actuellement à l'étude dans le cadre du processus visant à définir l'Approche stratégique et la gestion rationnelle des produits chimiques et des déchets après 2020 peut contribuer à la réalisation de cet objectif, le cas échéant.

En outre, tous les acteurs et décideurs, des fonctionnaires aux présidents-directeurs généraux d'entreprise en passant par les directeurs de

laboratoires de chimie, sont invités à se pencher sur l'analyse et les orientations exposées dans le présent manuel-cadre et à étudier la possibilité de lancer une « feuille de route pour la chimie verte et durable » au sein de leurs organisations. Le PNUE réfléchira plus avant à la manière concrète de faciliter le partage des connaissances entre les pays et les parties prenantes et d'appuyer le renforcement du développement des capacités. Par ailleurs, aux niveaux international et national/régional, les principales parties

prenantes, à l'exemple des gouvernements et des autorités régionales/locales, sont encouragées à coordonner leur action et à échafauder, avec les acteurs concernés, un plan d'action (ou feuille de route) cohérent. Globalement, ces efforts pourraient permettre de renforcer et d'intensifier l'action concertée menée à l'échelle mondiale pour promouvoir la chimie verte et durable, y compris dans les pays en développement et les pays à économie en transition.



**Together we can make
green and sustainable
chemistry a reality**

REFERENCES

- Alcántar, K., Blake, A., Edwards, S. and Singla, V. (2017). *Selecting Safer Alternatives to Toxic Chemicals and Ensuring the Protection of the Most Vulnerable*. New York, NY: Selecting Safer Alternatives to Toxic Chemicals and Ensuring the Protection of the Most Vulnerable. <https://www.nrdc.org/sites/default/files/toxic-chemicals-vulnerable-populations-report.pdf>.
- American Chemical Society (2015a). *How Industrial Applications in Green Chemistry are Changing our World*. <https://www.acs.org/content/dam/acsorg/membership/acs/benefits/extra-insights/green-chemistry-applications.pdf>.
- American Chemical Society (2015b). Special issue, earth abundant metals in homogeneous catalysis. *Accounts of Chemical Research*. Chirik, P. and Morris, R. (eds.). https://pubs.acs.org/page/achre4/earth_abundant_metals.html. Accessed 12 December 2020.
- American Chemical Society (2020a). 12 design principles of green chemistry. <https://www.acs.org/content/acs/en/greenchemistry/what-is-green-chemistry/principles/12-principles-of-green-chemistry.html>. Accessed 7 December 2020.
- American Chemical Society (2020b). The 25th annual green chemistry & engineering conference. ACS Green Chemistry Institute. <https://www.gcande.org/>. Accessed 7 December 2020.
- Anastas, P.T. and Warner, J.C. (1998). *Green Chemistry: Theory and Practice*. Oxford University Press. <https://global.oup.com/academic/product/green-chemistry-theory-and-practice-9780198506980?cc=ch&lang=en&>.
- Anastas, P.T. and Zimmerman, J.B. (2003). Design through the 12 principles of green engineering: sustainability requires objectives at the molecular, product, process, and system levels. *Environmental Science & Technology* 37(5), 94A-101A. <https://doi.org/10.1021/es032373g>.
- Anastas, P.T. and Zimmerman, J.B. (2019). The periodic table of the elements of green and sustainable chemistry. *Green Chemistry*. <https://doi.org/10.1039/c9gc01293a>.
- Andrews, E.S., Barthel, L.-P., Tabea, B., Benoît, C., Citroth, A., Cucuzzella, C., Gensch, C.-O., Hébert, J., Lesage, P., Manhart, A., Mazeau, P., Mazijn, B., Methot, A.-L., Moberg, A., Norris, G., Parent, J., Prakash, S., Reveret, J.-P., Spillemaeckers, S., Ugaya, C.M.L., Valdivia, S. and Weidema, B. (2009). *Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products: Social and Socio-Economic LCA Guidelines Complementing Environmental LCA and Life Cycle Costing, Contributing to the Full Assessment of Goods and Services within the Context of Sustainable Development*. Benoît, C. and Mazijn, B. (eds.). Nairobi: United Nations Environment Programme. http://www.unep.fr/shared/publications/pdf/dtix1164xpa-guidelines_slca.pdf.
- Arvidsson, R., Hildenbrand, J., Baumann, H., Islam, K.M.N. and Parsmo, R. (2018). A method for human health impact assessment in social LCA: lessons from three case studies. *International Journal of Life Cycle Assessment* 23(3), 690-699. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1116-7>.
- Bazzanella, A., Friege, H. and Zeschmar-Lahl, B. (2017). *Identification of Priority Topics in the Field of Sustainable Chemistry*. Dessau-Roßlau: Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Building and Nuclear Safety. <https://www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/identification-of-priority-topics-in-the-field-of>.
- BCC Research (2016). Global concerns promoting growth of 'green' chemistry markets, reports BCC Research, 4 April. *Marketwired*. <https://www.bccresearch.com/pressroom/env/global-concerns-promoting-growth-of-green-chemistry-markets>. Accessed 24 June 2020.
- Becker, M. and Tickner, J.A. (2020). Driving safer products through collaborative innovation: lessons learned from the Green Chemistry & Commerce Council's collaborative innovation challenge for safe and effective preservatives for consumer products. *Sustainable Chemistry and Pharmacy* 18(100330), 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2020.100330>.
- Bell, G., Schuck, S., Jungmeier, G., Wellisch, M., Felby, C., Jørgensen, H., Stichnothe, H., Clancy, M., De Bari, I., Kimura, S., van Ree, R., de Jong, E., Annevelink, B., Kwant, K., Torr, K. and Spaeth, J. (2014). *Task Force 42 Biorefining: Sustainable and Synergetic Processing of Biomass into Marketable Food & Feed Ingredients, Products (Chemicals, Materials) and Energy (Fuels, Power, Heat) The Netherlands (Coordinator) Electronic Copies*. van Ree, R. and van Zeeland, A. (eds.). Wageningen: IEA Bioenergy. https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2014/09/IEA-Bioenergy-Task42-Biorefining-Brochure-SEP2014_LR.pdf.
- Benjamin, S., Masai, E., Kamimura, N., Takahashi, K., Anderson, R.C. and Faisal, P.A. (2017). Phthalates impact human health: epidemiological evidences and plausible mechanism of action. *Journal of Hazardous Materials* 340, 360-383. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.06.036>.

- Bhadani, A., Kafle, A., Ogura, T., Akamatsu, M., Sakai, K., Sakai, H. and Abe, M. (2020). Current perspective of sustainable surfactants based on renewable building blocks. *Current Opinion in Colloid and Interface Science* 45, 124-135. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2020.01.002>.
- Bisgaard, T. and Tuck, K. (2014). *The Business Case for Eco-Innovation*. Pegram, J., Madhuvantthe and Panild, U.N. (eds.). Nairobi: United Nations Environment Programme. http://unep.ecoinnovation.org/wp-content/uploads/2017/07/UN_Environment_Eco—i_Business-case.pdf.
- Blum, C., Bunke, D., Hungsberg, M., Roelofs, E., Joas, A., Joas, R., Blepp, M. and Stolzenberg, H.-C. (2017). The concept of sustainable chemistry: key drivers for the transition towards sustainable development. *Sustainable Chemistry and Pharmacy* 5, 94-104. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2017.01.001>.
- Bocqué, M., Voirin, C., Lapinte, V., Caillol, S. and Robin, J.J. (2015). Petro-based and bio-based plasticizers: chemical structures to plasticizing properties. *Journal of Polymer Science, Part A: Polymer Chemistry* 54(1), 11-33. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/pola.27917>.
- Broman, G.I. and Robèrt, K.H. (2017). A framework for strategic sustainable development. *Journal of Cleaner Production* 140, 17-31. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.121>.
- Buckley, H.L., Hart-Cooper, W.M., Kim, J.H., Faulkner, D.M., Cheng, L.W., Chan, K.L., Vulpe, C.D., Orts, W.J., Amrose, S.E. and Mulvihill, M.J. (2017). Design and testing of safer, more effective preservatives for consumer products. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering* 5(5), 4320-4331. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b00374>.
- Buhl, A., Schmidt-Keilich, M., Muster, V., Blazejewski, S., Schrader, U., Harrach, C., Schäfer, M. and Süßbauer, E. (2019). Design thinking for sustainability: why and how design thinking can foster sustainability-oriented innovation development. *Journal of Cleaner Production* 231, 1248-1257. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.259>.
- Business Wire (2015). BASF and solazyme launch the first commercial microalgae-derived betaine surfactant, 28 July. <https://www.businesswire.com/news/home/20150728005434/en/BASF-Solazyme-Launch-Commercial-Microalgae-Derived-Betaine-Surfactant>. Accessed 7 December 2020.
- Business Wire (2019). Global green chemicals market will grow at a CAGR of 10% during 2019-2023, 29 May. *Technavio Research*. <https://www.businesswire.com/news/home/20190529005081/en/Global-Green-Chemicals-Market-Will-Grow-at-a-CAGR-of-10-During-2019-2023-Technavio>. Accessed 11 December 2020.
- Buxton, L. (2016). Hoffmann-La Roche's goal to phase out SVHCs, December. *Chemical Watch*. <https://chemicalwatch.com/51621/hoffmann-la-roches-goal-to-phase-out-svhcs>. Accessed 26 June 2020.
- Carroll, W.F. (2019). Mapping out the future of green chemistry education. *Chemical & Engineering News* 97(31). <https://cen.acs.org/acs-news/comment/Mapping-future-green-chemistry-education/97/i31>.
- Chakraborty, S., Leitus, G. and Milstein, D. (2016). Selective hydrogenation of nitriles to primary amines catalyzed by a novel iron complex. *Chemical Communications* 52(9), 1812-1815. <https://doi.org/10.1039/c5cc08204h>.
- Chemie³ (n.d.). Wesentlichkeitsanalyse: der chemie3-nachhaltigkeits-check. <https://www.chemiehoch3.de/nachhaltigkeitscheck/>. Accessed 15 December 2020.
- Clark, J.H. (2006). Green chemistry: today (and tomorrow). *Green Chemistry* 8(1), 17-21. <https://doi.org/10.1039/b516637n>.
- Davies, D.W., Butler, K.T., Jackson, A.J., Morris, A., Frost, J.M., Skelton, J.M. and Walsh, A. (2016). Computational screening of all stoichiometric inorganic materials. *Chem* 1(4), 617-627. <https://doi.org/10.1016/j.chempr.2016.09.010>.
- Elgie, S. and Brownlee, M. (2017). *Accelerating Clean Innovation in Canada*. Ottawa: Smart Prosperity Institute. <https://institute.smartprosperity.ca/sites/default/files/acceleratingcleaninnovationincanada.pdf>.
- Elhacham, E., Ben-Uri, L., Grozovski, J., Bar-On, Y.M. and Milo, R. (2020). Global human-made mass exceeds all living biomass. *Nature* 588(7838), 442-444. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-3010-5>.
- Elsevier (2020). 5th green & sustainable chemistry conference: online – live and on-demand | 10-11 November 2020. <https://www.elsevier.com/events/conferences/green-and-sustainable-chemistry-conference>. Accessed 7 December 2020.
- Elsevier (2020b). 2020 Elsevier green and sustainable chemistry challenge. <https://www.elsevier.com/events/conferences/green-and-sustainable-chemistry-conference/about/green-and-sustainable-chemistry-challenge>. Accessed 14 December 2020.
- Ernst & Young (2016). *Green Bonds: A Fresh Look at Financing Green Projects*. [https://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/Green_bonds-a-fresh-look-at-financing-green-projects/\\$FILE/EY-Green%20bonds-a-fresh-look-at-financing-green-projects.pdf](https://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/Green_bonds-a-fresh-look-at-financing-green-projects/$FILE/EY-Green%20bonds-a-fresh-look-at-financing-green-projects.pdf).
- Erythropel, H., Börmann, A., Nicell, J., Leask, R. and Maric, M. (2018). Designing green plasticizers: linear alkyl diol dibenzoate plasticizers and a thermally reversible plasticizer. *Polymers* 10(6), 646. <https://doi.org/10.3390/polym10060646>.
- Etzkowitz, H., Ranga, M., Benner, M., Guarany, L., Maculan, A.M. and Kneller, R. (2008). Pathways to the entrepreneurial university: towards a global convergence. *Science and Public Policy* 35(9), 681-695. <https://doi.org/10.3152/030234208x389701>.

- European Chemicals Agency (2011). *Guidance on the Preparation of an Application for Authorisation*. Version 1. https://echa.europa.eu/documents/10162/13643/authorisation_application_en.pdf.
- European Commission (1996). Council Directive 96/61/EC of 24 September 1996 concerning integrated pollution prevention and control. *Official Journal of the European Communities* L(257), 26-40. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.1996.257.01.0026.01.ENG&toc=OJ:L:1996:257:TOC.
- European Commission (2011). *Opinion on Parabens: COLIPA N° P82*. SCCS/1348/10. Brussels: Scientific Committee on Consumer Safety. <https://doi.org/10.2772/30176>.
- European Commission (2019). *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: The European Green Deal*. COM(2019) 640 final. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1596443911913&uri=CELEX:52019DC0640#document2>.
- European Commission (2020). Chemicals strategy: the EU's chemicals strategy for sustainability towards a toxic-free environment. https://ec.europa.eu/environment/strategy/chemicals-strategy_en. Accessed 14 December 2020.
- European Commission (n.d.). Sustainable products initiative. <https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12567-Sustainable-products-initiative>. Accessed 14 December 2020.
- European Commission and Organisation for Economic Co-operation and Development (2012). *A Guiding Framework for Entrepreneurial Universities*. <https://www.oecd.org/site/cfecpr/EC-OECD%20Entrepreneurial%20Universities%20Framework.pdf>.
- European Technology Platform for Sustainable Chemistry (2019). *Strategic Innovation and Research Agenda: Innovation Priorities for EU and Global Challenges*. Brussels. <http://www.suschem.org/highlights/suschem-identifies-key-technology-priorities-to-address-eu-and-global-challenges-in-its-new-strategic-research-and-innovation-agenda>.
- Fanelli, F., Parisi, G., Degennaro, L. and Luisi, R. (2017). Contribution of microreactor technology and flow chemistry to the development of green and sustainable synthesis. *Beilstein Journal of Organic Chemistry* 13, 520-542. <https://doi.org/10.3762/bjoc.13.51>.
- Fantke, P. and Illner, N. (2019). Goods that are good enough: introducing an absolute sustainability perspective for managing chemicals in consumer products. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry* 15, 91-97. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2018.12.001>.
- Fermeglia, M., Longo, G. and Toma, L. (2009). Computer aided design for sustainable industrial processes: specific tools and applications. *AIChE Journal* 55(4), 1065-1078. <https://doi.org/10.1002/aic.11730>.
- Freire, M.G. and Coutinho, J.A.P. (2019). Editorial overview: a closer look on sustainable solvents and processes. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry* 18, A4-A6. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2019.07.003>.
- Gauthier, A.M., Fung, M., Panko, J., Kingsbury, T., Perez, A.L., Hitchcock, K., Ferracini, T., Sahmel, J., Banducci, A., Jacobsen, M., Abelmann, A. and Shay, E. (2014). Chemical assessment state of the science: evaluation of 32 decision-support tools used to screen and prioritize chemicals. *Integrated Environmental Assessment and Management* 11(2), 242-255. <https://doi.org/10.1002/ieam.1605>.
- Gaona, S. (2017). The Utility of the Toxic Release Inventory (TRI) in Tracking Implementation and Environmental Impact of Industrial Green Chemistry Practices in the United States. *Green Chemistry*, 147. <https://doi.org/10.5772/intechopen.70716>
- Gee, D., Grandjean, P., Hansen, S.F., van den Hove, S., MacGarvin, M., Martin, J., Nielsen, G., Quist, D. and Stanners, D. (2013). *Late Lessons from Early Warnings: Science, Precaution, Innovation: Summary*. No 1/2013. Copenhagen: European Environment Agency. <https://www.eea.europa.eu/publications/late-lessons-2>.
- German Environment Agency (2009). *Sustainable Chemistry: Positions and Criteria of the Federal Environment Agency*. <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3798.pdf>.
- German Ministry of Education and Research and German Ministry of Food and Agriculture (2020). *National Bioeconomy Strategy: Summary*. https://www.bmbf.de/files/2020_1501_National-Bioeconomy-Strategy_Summary_accessible.pdf.
- Government of the United States (n.d.). Indicator 12.6.1: number of companies publishing sustainability reports. *U.S. National Statistics for the U.N. Sustainable Development Goals*. <https://sdg.data.gov/12-6-1/>. Accessed 14 December 2020.
- Green Chemistry & Commerce Council (n.d.). GC3 publications. *Lowell Center for Sustainable Production*. <https://greenchemistryandcommerce.org/resources/gc3-publications>. Accessed 11 December 2020.
- Green Science Policy Institute (2013). Pop Stop: Denmark retailer stops sale of microwave popcorn amid health fears, 3 June. <http://greensciencepolicy.org/pop-stop/>. Accessed 24 June 2020.
- GreenCentre Canada (2020). About us. <https://greencentrecanada.com/about-us/>. Accessed 14 December 2020.

GreenScreen (2020) GreenScreen for safer chemicals. <https://www.greenscreenchemicals.org/>. Accessed 24 June 2020.

Harmon, J.P. and Otter, R. (2017). Green chemistry and the search for new plasticizers. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering* 6(2), 2078-2085. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b03508>.

Health and Safety Executive (2003). *HSE Information Sheet - Solvents: Construction Information Sheet No 27 (Revision 2)*. <https://www.hse.gov.uk/pUbns/cis27.pdf>.

Hellweg, S. and Milà i Canals, L. (2014). Emerging approaches, challenges and opportunities in life cycle assessment. *Science*. 344(6188), 1109-1113. <https://doi.org/10.1126/science.1248361>.

Hill, J., Kumar, D.D. and Verma, R.K. (2013). Challenges for chemical education: engaging with green chemistry and environmental sustainability. *Journal of the American Institute of Chemists* 86(1), 24-31. http://www.theaic.org/pub_thechemist_journals/Vol-86-No-1/Vol-86-No1-Article-5.pdf.

Howell, B.A., Daniel, Y.G. and Ostrander, E.A. (2018). Flame retardants from renewable sources: food waste, plant oils, and starch. In *Green Polymer Chemistry: New Products, Processes, and Applications*. Cheng, H.N., Gross, R.A. and Smith, P.B. (eds.). Washington, DC: American Chemical Society. Chapter 25. 405-421. <https://doi.org/10.1021/bk-2018-1310.ch025>.

Howell, B.A., Oberdorfer, K.L. and Ostrander, E.A. (2018). Phosphorus flame retardants for polymeric materials from gallic acid and other naturally occurring multihydroxybenzoic acids. *International Journal of Polymer Science* 2018, 1-12. <https://doi.org/10.1155/2018/7237236>.

Innovation for Sustainable Development Network (2019). Chromatogeny: green chemistry to make paper water-repellent, 18 April. <https://www.inno4sd.net/chromatogeny-green-chemistry-to-make-paper-water-repellent-246>. Accessed 7 December 2020.

International Bank for Reconstruction and Development and World Bank (2017). *What Are Green Bonds?* <http://documents.worldbank.org/curated/en/400251468187810398/pdf/99662-REVISED-WB-Green-Bond-Box393208B-PUBLIC.pdf>.

International Energy Agency (2014). *Energy Technology Roadmap: A Guide to Development and Implementation*. <https://webstore.iea.org/download/direct/443>.

International Energy Agency (2019). *Putting CO₂ to Use: Creating Value from Emissions*. <https://www.iea.org/reports/putting-co2-to-use>.

International Labour Organization (2000). *ABC of Women Workers' Rights and Gender Equality*. 1st edn. http://www.ilo.org/global/publications/books/WCMS_080613/lang-en/index.htm.

International Organization for Standardization (2016). *ISO 14040:2006(En) Environmental Management — Life Cycle Assessment — Principles and Framework*. ISO/TC 207/SC 5 Life cycle assessment. 2nd edn. <https://www.iso.org/standard/37456.html>.

International Sustainable Chemistry Collaborative Centre (2020a). ISC3 - International Sustainable Chemistry Collaborative Centre: activities. <https://www.isc3.org/en/activities/collaboration.html>. Accessed 7 December 2020.

International Sustainable Chemistry Collaborative Centre (2020b). Finalists of the ISC3 innovation challenge in sustainable building and living 2019/20 selected! <https://www.isc3.org/en/activities/innovation/innovation-challenge.html>. Accessed 14 December 2020.

Inter-Organization Programme for the Sound Management of Chemicals (2018). *Chemicals and Waste Management: Essential to Achieving the Sustainable Development Goals (SDGs)*. http://www.who.int/iomc/Chemicals_SDGs_interactive_Feb2018.pdf.

Jackson, D.J. (2011). *What Is an Innovation Ecosystem?* Arlington, VA: National Science Foundation. <http://www.sustainablescale.org/ConceptualFramework/UnderstandingScale/BasicConcepts/EcosystemFunctionsServices.aspx>.

Jamarani, R., Erythropel, H., Nicell, J., Leask, R. and Marić, M. (2018). How green is your plasticizer? *Polymers* 10(8), 834-851. <https://doi.org/10.3390/polym10080834>.

Jimenez-Gonzalez, C., Ponder, C.S., Broxterman, Q.B. and Manley, J.B. (2011). Using the right green yardstick: why process mass intensity is used in the pharmaceutical industry to drive more sustainable processes. *Organic Process Research and Development* 15(4), 912-917. <https://doi.org/10.1021/op200097d>.

Joas, R. Abraham, V. and Joas, A. (2018). Chemical leasing: a business model to drive resource efficiency in the supply chain, In *Factor X*. Chapter 28. 395-403. https://doi.org/10.1007/978-3-319-50079-9_28.

Johnston, J. and Cushing, L. (2020). Chemical exposures, health, and environmental justice in communities living on the fenceline of industry. *Current Environmental Health Reports* 7(1), 48-57. <https://doi.org/10.1007/s40572-020-00263-8>.

Kalantari, F., Tahir, O.M., Joni, R.A. and Fatemi, E. (2018). Opportunities and challenges in sustainability of vertical farming: a review. *Journal of Landscape Ecology* 11(1), 35-60. <https://doi.org/10.1515/jlecol-2017-0016>.

- Kandasamy, R., Rajasekaran, M., Venkatesan, S.K. and Uddin, M. (2019). New trends in the biomanufacturing of green surfactants: biobased surfactants and biosurfactants. In *Next Generation Biomanufacturing Technologies*. Rathinam, N.K. and Sani, R.K. (eds.). Washington, DC: American Chemical Society. Chapter 11. 243-260. <https://doi.org/10.1021/bk-2019-1329.ch011>.
- Karan, H., Funk, C., Grabert, M., Oey, M. and Hankamer, B. (2019). Green bioplastics as part of a circular bioeconomy. *Trends in Plant Science* 24(3), 237-249. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2018.11.010>.
- Kaushik, M. and Moores, A. (2017). New trends in sustainable nanocatalysis: emerging use of earth abundant metals. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry* 7, 39-45. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2017.07.002>.
- Kaya, M. and Tabak, A. (2020). Recycling of an agricultural bio-waste as a novel cellulose aerogel: a green chemistry study. *Journal of Polymers and the Environment* 28(1), 323-330. <https://doi.org/10.1007/s10924-019-01609-6>.
- Kershaw, P.J. (2015). *Biodegradable Plastics and Marine Litter: Misconceptions, Concerns and Impacts on Marine Environments*. Nairobi: United Nations Environment Programme. <http://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/7468>.
- King, A. (2017). Technology: the future of agriculture. *Nature* 544(7651), S21-S23. <https://doi.org/10.1038/544s21a>.
- Kirkpatrick, P. and Ellis, C. (2004). Chemical space. *Nature* 432(7019), 823-823. <https://doi.org/10.1038/432823a>.
- Klofsten, M., and Jones-Evans, D. (2000). Comparing academic entrepreneurship in Europe – the case of Sweden and Ireland. *Small Business Economics* 14(4), 299-309. <https://doi.org/10.1023/A:1008184601282>.
- Kobayashi, S., Uyama, H. and Kadokawa, J. (eds.) (2019). *Enzymatic Polymerization towards Green Polymer Chemistry. Green Chemistry and Sustainable Technology. Gateway East: Springer Singapore*. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-3813-7>.
- Kohli, K., Prajapati, R. and Sharma, B. (2019). Bio-based chemicals from renewable biomass for integrated biorefineries. *Energies* 12(2), 1-40. <https://doi.org/10.3390/en12020233>.
- Kümmerer, K. (2017). Sustainable chemistry: a future guiding principle. *Angewandte Chemie International Edition* 56(52), 16420-16421. <https://doi.org/10.1002/anie.201709949>.
- Kümmerer, K., Clark, J.H. and Zuin, V.G. (2020). Rethinking chemistry for a circular economy. *Science* 367(6476), 369-370. <https://doi.org/10.1126/science.aba4979>.
- Laoutid, F., Karaseva, V., Costes, L., Brohez, S., Mincheva, R. and Dubois, P. (2018). Novel bio-based flame retardant systems derived from tannic acid. *Journal of Renewable Materials* 6(6), 559-572. <https://doi.org/10.32604/jrm.2018.00004>.
- Larcher, D. and Tarascon, J.-M. (2015). Towards greener and more sustainable batteries for electrical energy storage. *Nature Chemistry* 7(1), 19-29. <https://doi.org/10.1038/nchem.2085>.
- Linthorst, J.A. (2010). An overview: origins and development of green chemistry. *Foundations of Chemistry* 12(1), 55-68. <https://doi.org/10.1007/s10698-009-9079-4>.
- Lipinski, D. (2019). *H.R.2051: Sustainable Chemistry Research and Development Act of 2019*. 116th Congress (2019-2020). Washington, DC: United States Congress. <https://www.congress.gov/bill/116th-congress/house-bill/2051>.
- Liu, D. and Chen, E.Y.X. (2014). Organocatalysis in biorefining for biomass conversion and upgrading. *Green Chemistry* 16(3), 964-981. <https://doi.org/10.1039/c3gc41934g>.
- Lopes Da Silva, C.E., Baptista Narcizo, R. and Cardoso, R. (2012). The proximity between academy, industry and government: towards a more sustainable development of a Brazilian oil region. Selection and/or peer review under responsibility of Institut Teknologi Bandung. *Procedia-Social and Behavioral Sciences* 52, 100-109. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.446>.
- Malairaja, C. and Zawdie, G. (2008). Science parks and university–industry collaboration in Malaysia. *Technology Analysis & Strategic Management* 20(6), 727-739. <https://doi.org/10.1080/09537320802426432>.
- McCrorry, G., Schöpke, N., Holmén, J. and Holmberg, J. (2020). Sustainability-oriented labs in real-world contexts: an exploratory review. *Journal of Cleaner Production* 277(123202), 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123202>.
- Meninno, S. (2020). Valorization of waste: sustainable organocatalysts from renewable resources. *ChemSusChem* 13(3), 437-437. <https://doi.org/10.1002/cssc.202000007>.
- Mubofu, E.B. (2016). Castor oil as a potential renewable resource for the production of functional materials. *Sustainable Chemical Processes* 4(1), 11. <https://doi.org/10.1186/s40508-016-0055-8>.
- Northwest Product Stewardship Council (n.d.). What is product stewardship? <http://productstewardship.net/about/what-product-stewardship>. Accessed 14 December 2020.
- NSF International (n.d.). *Questions and Answers on NSF/GCI 355: Greener Chemicals and Processes Information Standard*. https://d2evkimvhatqav.cloudfront.net/documents/GC_355_Insert_LT_EN_LGC26050812.pdf.

- Oberle, B., Bringezu, S., Hatfield-Dodds, S., Hellweg, S., Schandl, H., Clement, J., Cabernard, L., Che, N., Chen, D., Droz-Georget, H., Ekins, P., Fischer-Kowalski, M., Flörke, M., Frank, S., Froemelt, A., Geschke, A., Haupt, M., Havlik, P., Hüfner, R., Lenzen, M., Lieber, M., Liu, B., Lu, Y., Lutter, S., Mehr, J., Miatto, A., Newth, D., Oberschelp, C., Obersteiner, M., Pfister, S., Piccoli, E., Schaldach, R., Schüngel, J., Sonderegger, T., Sudheshwar, A., Tanikawa, H., van der Voet, E., Walker, C., West, J., Wang, Z. and Zhu, B. (2019). *Global Resources Outlook 2019: Natural Resources for the Future We Want*. A report of the International Resource Panel. Nairobi: United Nations Environment Programme. <http://www.resourcepanel.org/file/1172/download?token=muaePxOQ>.
- Ocampo-López, C., Ramírez-Carmona, M., Rendón-Castrillón, L. and Vélez-Salazar, Y. (2019). Applied research in biotechnology as a source of opportunities for green chemistry start-ups. *Sustainable Chemistry and Pharmacy* 11, 41-45. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2018.12.005>.
- Organisation for Economic Co-operation and Development (2010). *OECD Global Forum on Environment Focusing on Sustainable Materials Management: Policy Report 1 - Policy Principles for Sustainable Materials Management Working Document*. <http://www.oecd.org/env/waste/46111789.pdf>.
- Organisation for Economic Co-operation and Development (2012). *The Role of Government Policy in Supporting the Adoption of Green/Sustainable Chemistry Innovations*. [http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=en/jm/mono\(2012\)3&doclanguage=en](http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=en/jm/mono(2012)3&doclanguage=en).
- Organisation for Economic Co-operation and Development (2018). Sustainable chemistry. <http://www.oecd.org/chemicalsafety/risk-management/sustainablechemistry.htm>. Accessed 20 June 2020.
- Organisation for Economic Co-operation and Development (n.d.). Extended producer responsibility. <https://www.oecd.org/env/tools-evaluation/extendedproducerresponsibility.htm>. Accessed 14 December 2020.
- Organisation for Economic Co-operation and Development. (n.d.). Database on policy instruments for the environment. <https://pinedatabase.oecd.org/>. Accessed 24 June 2020.
- Oviatt, B.M. and McDougall, P.P. (2005). Toward a theory of international new ventures. *Journal of International Business Studies* 36(1), 29-41. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jibs.8400128>.
- Panko, J., Hitchcock, K., Fung, M., Spencer, P., Kingsbury, T. and Mason, A. (2017). A comparative evaluation of five hazard screening tools. *Integrated Environmental Assessment and Management*. 13(1), 139-154. <https://doi.org/10.1002/ieam.1757>.
- Peabody O'Brien, K., Franjevic, S. and Jones, J. (2009). *Green Chemistry and Sustainable Agriculture: The Role of Biopesticides*. Charlottesville, VA: Advancing Green Chemistry. <http://advancinggreenchemistry.org/wp-content/uploads/Green-Chem-and-Sus.-Ag.-the-Role-of-Biopesticides.pdf>.
- Phaal, R., Farrukh, C.J.P. and Probert, D.R. (2004). Technology roadmapping - a planning framework for evolution and revolution. *Technological Forecasting and Social Change* 71(1-2), 5-26. [https://doi.org/10.1016/s0040-1625\(03\)00072-6](https://doi.org/10.1016/s0040-1625(03)00072-6).
- Philp, J.C., Ritchie, R.J. and Allan, J.E.M. (2013). Biobased chemicals: the convergence of green chemistry with industrial biotechnology. *Trends in Biotechnology* 31(4), 219-222. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2012.12.007>.
- Pike Research (2011). Green chemistry: biobased chemicals, renewable feedstocks, green polymers, less-toxic alternative chemical formulations, and the foundations of a sustainable chemical industry. *Industrial Biotechnology* 7(6), 431-433. <https://doi.org/10.1089/ind.2011.1003>.
- Platt, D. (2004). Terry Collins develops 'green' catalysts for potential use in industry and biological warfare, 8 April. *Carnegie Mellon Today*. https://www.cmu.edu/cmnews/extra/030911_saferliving.html. Accessed 10 December 2020.
- Pradeep, P., Friedman, K.P. and Judson, R. (2020). Structure-based QSAR models to predict repeat dose toxicity points of departure. *Computational Toxicology* 16, 100139. <https://doi.org/10.1016/j.comtox.2020.100139>.
- Ravelli, D., Dondi, D., Fagnoni, M. and Albin, A. (2009). Photocatalysis. a multi-faceted concept for green chemistry. *Chemical Society Reviews* 38(7), 1999-2011. <https://doi.org/10.1039/b714786b>.
- ReportLinker (2020). Global green chemicals industry, 7 July. *GlobeNewswire*. <https://www.globenewswire.com/news-release/2020/07/07/2058992/0/en/Global-Green-Chemicals-Industry.html>. Accessed 25 January 2021.
- RoadToBio (2020). Welcome to RoadToBio: roadmap for the chemical industry in Europe towards a bioeconomy. <https://www.roadtobio.eu/>. Accessed 15 December 2020.
- Rossi, M.S., Edwards, S., Peele, C. and Greiner, T. (2017). *The Chemical Footprint Project: 2017 Annual Report*. Chemical Footprint Project. <https://www.chemicalfootprint.org/results/2017-report>.
- Royal Society of Chemistry (2020). Energy: supporting the chemical science community to help create a sustainable energy future. <https://www.rsc.org/campaigning-outreach/global-challenges/energy/#solarfuels>. Accessed 14 December 2020.

- Ryberg, M.W.R., Laurent, A. and Hauschild, M. (2018). *Mapping of Global Plastics Value Chain and Plastics Losses to the Environment: With a Particular Focus on Marine Environment*. Nairobi: United Nations Environment Programme. <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/26745>.
- Ryzhonkov, V. (2013). Innovation ecosystem model, 3 August. *Entrepreneurship, Business Incubation, Business Models & Strategy Blog*. <https://worldbusinessincubation.wordpress.com/2013/08/04/demand-not-the-infrastructure-is-the-cornerstone-of-successful-innovation-ecosystem/innovation-ecosystem-model-2/>. Accessed 25 June 2020.
- Sarkis, J. (ed.) (2019). *Handbook on the Sustainable Supply Chain*. Cheltenham: Edward Elgar Publishing. <https://doi.org/10.4337/9781786434272>.
- ScienceDaily (2019). Artificial photosynthesis transforms carbon dioxide into liquefiable fuels, 22 May. *University of Illinois at Urbana-Champaign, News Bureau*. <https://www.sciencedaily.com/releases/2019/05/190522153121.htm>. Accessed 14 December 2020.
- Sheldon, R.A. (2017). The E factor 25 years on: the rise of green chemistry and sustainability. *Green Chemistry* 19(1), 18-43. <https://doi.org/10.1039/c6gc02157c>.
- Sheldon, R.A. (2019). The greening of solvents: towards sustainable organic synthesis. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry* 18, 13-19. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2018.11.006>.
- Sheldon, R.A. and Brady, D. (2019). Broadening the scope of biocatalysis in sustainable organic synthesis. *ChemSusChem* 12(13), 2859-2881. <https://doi.org/10.1002/cssc.201900351>.
- Sheldon, R.A. and Woodley, J.M. (2018). Role of biocatalysis in sustainable chemistry. *Chemical Reviews* 118(2), 801-838. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.7b00203>.
- Sheu, J.B. and Choi, T.M. (2019). Extended consumer responsibility: syncretic value-oriented pricing strategies for trade-in-for-upgrade programs. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 122, 350-367. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2018.12.016>.
- Smith, N.C. and Jarisch, D. (2019). INEOS chlorvinyls: a positive vision for PVC (a). In *Managing Sustainable Business*. Lenssen, G.G. and Smith, N.C. (eds.). Dordrecht: Springer Netherlands. Chapter 5. 83-102. https://doi.org/10.1007/978-94-024-1144-7_5.
- Sourcemap (2012). *iPhone 5*. [Map]. <https://open.sourcemap.com/maps/57d28966df2ac24b524c8fffb>. Accessed 24 June 2020.
- SpecialChem (2015). Organic monitor discusses future of green surfactants & emulsifiers in its latest study, 4 September. *Industry News*. <https://cosmetics.specialchem.com/news/industry-news/organic-monitor-discusses-future-of-green-surfactants-emulsifiers-000177331>. Accessed 7 December 2020.
- Stavins, R.N. (2001). *Experience with Market-Based Environmental Policy Instruments*. Discussion Paper. No. 01-58. Washington, D.C.: Resources for the Future. <https://ageconsearch.umn.edu/record/10909/files/dp010058.pdf>.
- Sterner, T. and Coria, J. (2011). *Policy Instruments for Environmental and Natural Resource Management*. 2nd edn. Washington, D.C.: Resources for the Future. <https://doi.org/10.4324/9781315780894>.
- Stockholm Resilience Centre (2016). How food connects all the SDGs. <http://www.stockholmresilience.org/research/research-news/2016-06-14-how-food-connects-all-the-sdgs.html>. Accessed 26 June 2020.
- Styring, P., Jansen, D., de Coninck, H., Reith, H. and Armstrong, K. (2012). *Carbon Capture and Utilisation in the Green Economy: Using CO₂ to Manufacture Fuel, Chemicals and Materials*. York: The Centre for Low Carbon Futures and CO₂Chem Publishing. <https://www.semanticscholar.org/paper/Carbon-Capture-and-Utilisation-in-the-green-economy-Coninck-ECN/5d2c7d791478526465b2d5dd68d7962414b34526>.
- Sustainable Packaging Coalition (2020). For people + the planet. <https://sustainablepackaging.org/>. Accessed 14 December 2020.
- Temper, L., Demaria, F., Scheidel, A., Del Bene, D. and Martinez-Alier, J. (2018). The Global Environmental Justice Atlas (EJAtlas): ecological distribution conflicts as forces for sustainability. *Sustainability Science* 13(3), 573-584. <https://doi.org/10.1007/s11625-018-0563-4>.
- The Natural Step (2020a). Our approach: the natural step framework. <https://thenaturalstep.org/approach/>. Accessed 15 December 2020.
- The Natural Step (2020b). Transition labs. <https://thenaturalstep.org/services/transition-labs/>. Accessed 15 December 2020.
- The Natural Step Canada (n.d.). Sustainability transition lab process. <http://www.naturalstep.ca/sustainability-transition-lab-process>. Accessed 15 December 2020.
- Together for Sustainability (2020). What is TFS? <https://tfs-initiative.com/>. Accessed 14 December 2020.
- United Nations Conference on Trade and Development (2019). *Methodology for SDG Indicator 12.6.1: Proposal from the Custodian Agencies*. https://environmentlive.unep.org/media/docs/projects/draft_proposal_methodology_12_6_1_may_2019.pdf.

United Nations Economic Commission for Europe (2012). *Innovation Review Performance Kazakhstan*. <https://www.unece.org/fileadmin/DAM/ceci/publications/icp5.pdf>.

United Nations Environment Programme (2017a). *Guidelines for Providing Product Sustainability Information: Global Guidance on Making Effective Environmental, Social and Economic Claims, to Empower and Enable Consumer Choice*. https://www.oneplanetnetwork.org/sites/default/files/guidelines_for_providing_product_sustainability_information_ciscp_2017_revised.pdf.

United Nations Environment Programme (2017b). *Advancing Entrepreneurship and Start-up Initiatives for Sustainable Chemistry: Learning from Case Studies. Compilation of Case Studies*. https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/22044/SC%20Startup%20WS_Case%20Studies%20Compilation_Final.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

United Nations Environment Programme (2019a). *Analysis of Stakeholder Submissions on Sustainable Chemistry Pursuant to UNEA Resolution 2/7*. SAICM/OEWG.3/INF/22. <http://www.saicm.org/Portals/12/Documents/meetings/OEWG3/inf/OEWG3-INF-22-Analysis.pdf>.

United Nations Environment Programme (2019b). *Global Chemicals Outlook II: From Legacies to Innovative Solutions - Implementing the 2030 Agenda for Sustainable Development*. <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/28113/GCOII.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

United Nations Environment Programme (2019c). *UNEP circularity platform*. https://buildingcircularity.org/wp-content/uploads/2019/11/Circularity_Diagram_UNEP.pdf.

United Nations Environment Programme (2020). *Life cycle initiative*. <https://www.lifecycleinitiative.org/>. Accessed 14 December 2020.

United Nations Industrial Development Organization (2017). *Industrial Development Report 2018. Demand for Manufacturing: Driving Inclusive and Sustainable Industrial Development*. <https://www.unido.org/news/industrial-development-report-2018-launched>.

United Nations Industrial Development Organization (2020). *What is CSR?* <https://www.unido.org/our-focus/advancing-economic-competitiveness/competitive-trade-capacities-and-corporate-responsibility/corporate-social-responsibility-market-integration/what-csr>. Accessed 14 December 2020.

United States Environmental Protection Agency (2017). *Sustainable materials management: non-hazardous materials and waste management hierarchy*, 10 August. <https://www.epa.gov/smm/sustainable-materials-management-non-hazardous-materials-and-waste-management-hierarchy>. Accessed 26 June 2020.

United States Environmental Protection Agency (2020a). *Sustainable materials management*, 30 October. <https://www.epa.gov/smm>. Accessed 14 December 2020.

United States Environmental Protection Agency (2020b). *Information about the green chemistry challenge*, 12 September. <https://www.epa.gov/greenchemistry/information-about-green-chemistry-challenge>. Accessed 14 December 2020.

United States Government Accountability Office (2018). *Chemical Innovation: Technologies to Make Processes and Products More Sustainable*. <https://www.gao.gov/products/GAO-18-307>.

United States National Research Council (2014). *A Framework to Guide Selection of Chemical Alternatives*. Washington, D.C.: National Academies Press. <http://www.nap.edu/catalog/18872>.

United States Occupational Safety and Health Administration (n.d.). *Transitioning to safer chemicals: a toolkit for employers and workers*. https://www.osha.gov/dsg/safer_chemicals/index.html. Accessed 15 December 2020.

van der Waals, J., Bougas, K., Keyte, I., Kreissig, J. and Smit, J. (2018). *Safe Chemicals Innovation Agenda: Towards a Research Agenda for Safe Chemicals, Materials and Products*. The Hague: The Netherlands, Ministry of Infrastructure and Water Management. <https://www.chemischestoffengoeidgeregeld.nl/sites/default/files/39982%20-%20Safe%20Chemicals%20Innovation%20Agenda%20-%2020180613i6%20final%20copy.pdf>.

Van Hamelen, E. (2018). *Without Chemistry There Can Be No Circular Economy: The Imperative of a New Perspective on Chemicals and Materials Management*. Planegg: The Natural Step. <https://thenaturalstep.org/wp-content/uploads/2018/05/20180508-Circular-chemistry-EN-BioEDIT-TNSinternational.pdf>.

Verster, B., Madonsela, Z., Minnaar, S., Cohen, B. and Harrison, S.T.L. (2014). *Introducing the Wastewater Biorefinery Concept: A Scoping Study of Poly-Glutamic Acid Production from a Bacillus-Rich Mixed Culture Using Municipal Wastewater*. WRC Report No. TT 587/13. Cape Town: Water Research Commission. https://www.researchgate.net/publication/283048384_Introducing_the_wastewater_biorefinery_concept.

Vitale, M.R., Oudeyer, S., Levacher, V. and Brière, J.-F. (2016). *Radical and Ion-Pairing Strategies in Asymmetric Organocatalysis*. London: ISTE Press Ltd and Elsevier Ltd. <https://www.sciencedirect.com/book/9781785481277/radical-and-ion-pairing-strategies-in-asymmetric-organocatalysis>.

Voorhees, K. and Hutchison, J.E. (2015). *Green chemistry education roadmap charts the path ahead*. *Chemical & Engineering News Archive* 93(38), 46. <https://doi.org/10.1021/cen-09338-comment>.

- Waerder, B., Stinnes, S. and Erdenberger, O. (2017). Design thinking as driver for innovation in the chemical industry. *Journal of Business Chemistry* 14(2), 41-50. <http://www.businesschemistry.org/article/?article=247>.
- Wageningen University & Research (n.d. a). Creating value from biomass. <https://www.wur.nl/Landingspagina-redacteuren-29/en/Research-Results/Research-Institutes/food-biobased-research/Research-themes/Creating-value-from-biomass.htm>. Accessed 7 July 2020.
- Wageningen University & Research (n.d. b). Circular & biobased economy. <https://www.wur.nl/en/Research-Results/Themes/theme-biobased-economy.htm>. Accessed 13 December 2020.
- Wang, F., Talaue McManus, L. and Xie, R. (eds.) (2019). *Addressing Marine Plastics: A Roadmap to a Circular Economy*. Arenal: United Nations Environment Programme. <https://gefmarineplastics.org/publications/addressing-marine-plastics-a-roadmap-to-a-circular-economy>.
- Whitesides, G. (2015). Reinventing Chemistry. *Angewandte Chemie International Edition* 54(11), 3196- 3209. <https://doi.org/10.1002/anie.201410884>.
- Woo, B., Kravitz-Wirtz, N., Sass, V., Crowder, K., Teixeira, S. and Takeuchi, D.T. (2019). Residential segregation and racial/ethnic disparities in ambient air pollution. *Race and Social Problems* 11(1), 60-67. <https://doi.org/10.1007/s12552-018-9254-0>.
- World Bank Group (2020). Small and medium enterprises (SMEs) finances: improving SMEs' access to finance and finding innovative solutions to unlock sources of capital. <https://www.worldbank.org/en/topic/smefinance>. Accessed 14 December 2020.
- World Business Council for Sustainable Development (2018). *Chemical Sector SDG Roadmap*. <https://www.wbcsd.org/Programs/People/Sustainable-Development-Goals/Resources/Chemical-Sector-SDG-Roadmap>.
- World Economic Forum (2017). *Digital Transformation Initiative: Chemistry and Advanced Materials Industry*. <http://reports.weforum.org/digital-transformation/wp-content/blogs.dir/94/mp/files/pages/files/dti-chemistry-and-advanced-materials-industry-white-paper.pdf>.
- World Economic Forum (2018). *Chemistry and Advanced Materials: Collaborative Innovation towards the Sustainable Development Goals*. Forthcoming. <https://www.weforum.org/>.
- World Health Organization (2018a). *The Public Health Impact of Chemicals: Knowns and Unknowns - Data Addendum for 2016*. <http://www.who.int/ipcs/publications/chemicals-public-health-impact/en/>.
- World Health Organization (2018b). *Chemicals Road Map: Workbook - Road Map to Enhance Health Sector Engagement in the Strategic Approach to International Chemicals Management towards the 2020 Goal and Beyond*. <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/273136/9789241513630-eng.pdf?ua=1>.
- World Health Organization (2020). International Programme on Chemical Safety: WHO chemicals road map and workbook - document links. <https://www.who.int/ipcs/saicm/roadmap-links/en/>. Accessed 15 December 2020.
- Yale University (n.d.). The global green chemistry initiative. *Yale Center for Green Chemistry and Green Engineering*. <https://www.global-green-chemistry-initiative.com/>. Accessed 14 December 2020.
- Zimmerman, J.B., Anastas, P.T., Erythropel, H.C. and Leitner, W. (2020). Designing for a green chemistry future. *Science* 367(6476), 397-400. <https://doi.org/10.1126/science.aay3060>.
- Zimmermann, L., Dombrowski, A., Völker, C. and Wagner, M. (2020). Are bioplastics and plant-based materials safer than conventional plastics? in vitro toxicity and chemical composition. *Environmental International* 145, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106066>.
- Zuin, V.G. (2016). Circularity in green chemical products, processes and services: innovative routes based on integrated eco-design and solution systems. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry* 2, 40-44. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2016.09.008>.
- Żukiewicz-Sobczak, W.A. (2013). The role of fungi in allergic diseases. *Postepy Dermatologii i Alergologii* 30(1), 42-45. <https://doi.org/10.5114/pdia.2013.33377>.



UN 
**environment
programme**

science.chemicals@un.org
www.unep.org

International Environment House I
Chemin des Anémones 15
1219 Châtelaine-Geneva

