



poste // mars 2023

Matériaux avancés

Pierres angulaires pour une sécurité et
Cycle de vie durable

Imprimer

Éditeur :

Agence allemande pour
l'environnement Section IV 2,2

Case postale 14 06

D-06813 Dessau-Roßlau

Tél. : +49 340-2103-0

buergerservice@uba.de

Internet : www.umweltbundesamt.de

 [/umweltbundesamt.de /](#)

 [umweltbundesamt /](#)

 [umweltbundesamt /](#)

 [umweltbundesamt](#)

Auteurs:

Kathrin Schwirn, Doris Volker

Avec l'apport de :

Birgit Ahrens, Silvia Berkner, Christopher Blum,

Werner Niederle, Katrin Süring, Lars Tietjen, Julia Vogel,

Petra Weißhaupt

Conception:

Atelier Hauer + Dörfler GmbH

Publications au format

pdf : www.umweltbundesamt.de/en/publications

Crédits photos :

Couverture : Prostock-studio/AdobeStock

Au : mars 2023

ISSN 2363-8273

poste // mars 2023

Matériaux avancés

Pierres angulaires pour une sécurité et

Cycle de vie durable

Table des matières

1 Contexte	6
2 Matériaux avancés dans le domaine de la tension entre climat, protection de l'environnement, de la santé et économie circulaire	8
2.1 Les matériaux avancés dans le contexte de l'environnement et de la santé	9
2.2 Matériaux avancés – Préservation des ressources et économie circulaire	10
2.3 Des matériaux avancés pour la protection du climat et la transition énergétique	12
3 Pierres angulaires pour des innovations matérielles sûres et durables	14
4 Résumé	20
Notes de fin	21

Les figures

Figure

1 Les 17 Objectifs de Développement Durable de l'ONU, divisés en biosphère, société et économie	6
2 Domaines d'application des matériaux avancés pertinents pour les différents thèmes de l'Agence allemande de l'environnement	8

1. Origines

La société mondiale est confrontée à des défis sans précédent. Le changement climatique d'origine humaine, la perte croissante de biodiversité et de ressources ainsi que la pollution chimique croissante menacent l'existence humaine telle que nous la connaissons. Le changement climatique et la perte de biodiversité sont interdépendants, se renforcent mutuellement et doivent donc être combattus conjointement. La prospérité d'aujourd'hui, en particulier dans les pays industrialisés, repose sur l'utilisation des ressources naturelles, telles que l'utilisation de combustibles fossiles et une utilisation mondiale croissante des terres, ainsi que sur l'utilisation croissante de produits chimiques. Cela a également un impact sur le changement climatique, la perte de biodiversité, la pollution et la santé humaine.

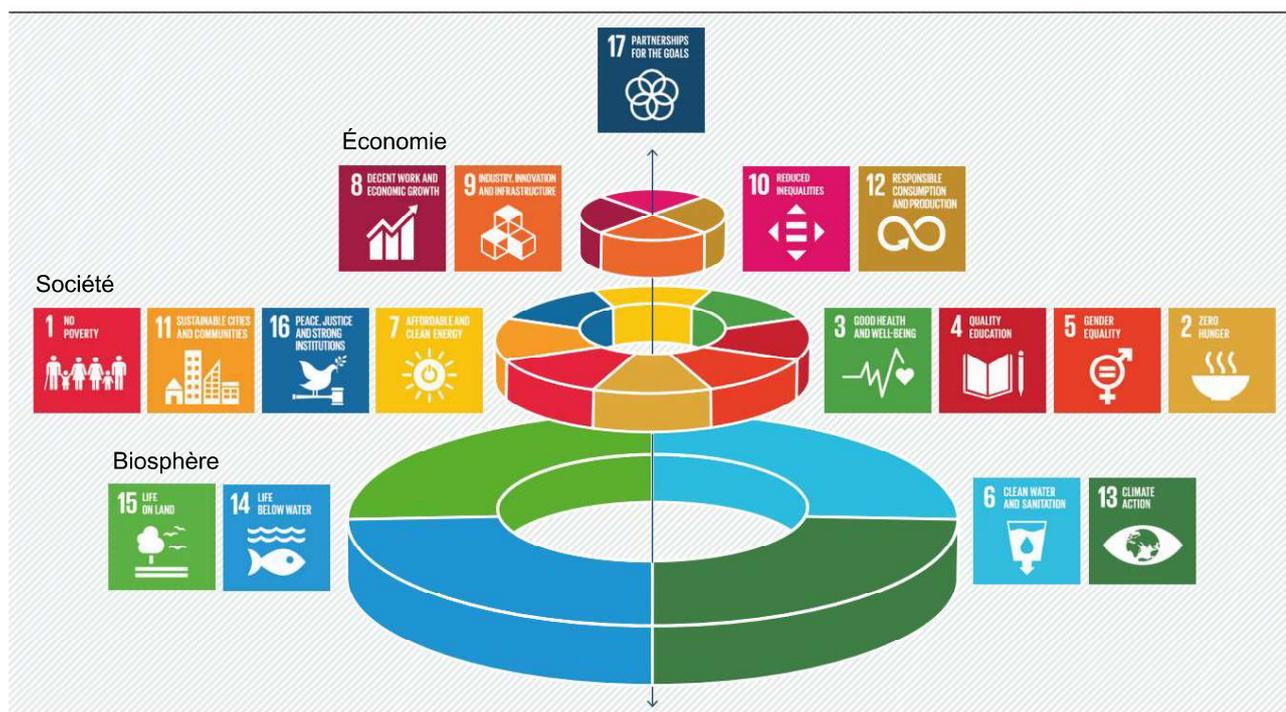
La capacité des générations présentes et futures à répondre à leurs besoins¹ suppose de pouvoir évoluer dans un espace sûr, en reconnaissant et en respectant les limites écologiques de la terre. Cette idée est à la base du concept de limites planétaires². Elle définit les conditions d'un développement durable en décrivant et quantifiant les frontières planétaires que les activités humaines ne doivent pas dépasser pour éviter des changements environnementaux inacceptables et irréversibles. L'Agenda 2030 des Nations Unies pour le développement durable

Le développement avec ses 17 objectifs de développement durable (ODD, figure 1)³, 169 cibles et 231 indicateurs contient une vision pour une société mondiale future basée sur les principes de durabilité. L'Agenda 2030 couvre les dimensions environnementales, économiques et sociales de la durabilité de manière intégrée et fournit des principes et des références aux décideurs locaux, nationaux, régionaux et commerciaux.

Pour transformer l'économie actuelle de l'UE en une économie plus verte et plus durable, la Commission européenne a présenté le Green Deal européen⁴. Le Green Deal comprend divers plans d'action, stratégies et initiatives visant à minimiser ou, si possible, à éliminer les effets (nocifs) des produits chimiques, matériaux, produits et services sur la santé humaine, le climat et l'environnement afin de garantir une économie circulaire durable. Cela se fait, entre autres, à travers des plans d'action pour l'économie circulaire, la neutralité climatique, la prévention de la pollution, ainsi que des stratégies telles que la stratégie des produits chimiques pour la durabilité, la stratégie de la ferme à la fourchette, les produits durables ou la bioéconomie Stratégie.

Figure 1

Les 17 objectifs de développement durable de l'ONU, divisés en biosphère, société et économie



Source : Jerker Lokrantz/Azote pour Stockholm Resilience Centre, Université de Stockholm

Les produits chimiques et les matériaux sont essentiels pour la fourniture de techniques, de matériaux et de produits à faible émission de CO₂, sans pollution, économes en énergie et en ressources. Ils sont indispensables à la transformation numérique et verte de la société et de l'économie. Les matériaux avancés promettent le potentiel d'offrir des solutions techniques pour la transition du système énergétique et des transports, la conservation des ressources, la numérisation ou les soins de santé⁵ afin de répondre aux défis mondiaux urgents. Par exemple, la stratégie de la Commission européenne en matière de produits chimiques pour la durabilité aborde ce potentiel des matériaux avancés pour soutenir la transformation verte et numérique et annonce la promotion de la recherche et du développement de matériaux avancés à utiliser dans divers domaines⁶.

Afin de soutenir le développement vers une société plus durable, il est indispensable que les matériaux avancés eux-mêmes soient sûrs et durables tout au long de leur cycle de vie. Du point de vue d'UBA, il est donc d'une grande importance d'identifier et d'éviter les défis pour la protection de l'environnement et la durabilité grâce à l'utilisation de matériaux avancés à un stade précoce.

organiser. Par conséquent, UBA vise à soutenir le développement sûr et durable des matériaux avancés et de leurs applications tout au long de leur cycle de vie. Bien que la sécurité chimique soit considérée comme une composante inhérente de la durabilité, ce document se concentre explicitement sur la sécurité chimique et la durabilité des matériaux avancés et de leurs applications. Cela sert à clarifier la position selon laquelle la sécurité chimique est une condition de base pour atteindre la durabilité, qui doit être remplie et ne peut être compensée par d'autres aspects de la durabilité. Ainsi, un matériau ou une application de pointe ne peut être considéré comme durable s'il existe un risque matériel pour l'homme ou l'environnement⁷

Ce document de position décrit, du point de vue d'UBA, les opportunités et les risques possibles des matériaux avancés et de leur utilisation en termes de développement durable. L'accent est également mis sur le champ de tension entre l'utilisation prometteuse et les défis potentiels pour la protection de l'environnement et de la santé et d'autres dimensions de la durabilité, illustrés par divers exemples, ainsi que sur les pierres angulaires qui en résultent pour le développement d'innovations matérielles sûres et durables.

Matériaux avancés

UBA traite des opportunités et des risques des nanomatériaux depuis 2006⁸. Au fil des années, il est devenu de plus en plus clair que la prise en compte des innovations matérielles ne peut se limiter à une limite supérieure de 100 nm. UBA a donc élargi sa perspective pour inclure d'autres matériaux avancés. Les matériaux avancés sont ceux qui, par le contrôle précis de leur composition et de leur structure interne et externe, sont délibérément structurés ou conçus de manière à répondre à de nouvelles exigences fonctionnelles⁹. Cette description approximative comprend une variété et une diversité de matériaux avec différentes structures, propriétés et fonctionnalités de complexité variable, qui peuvent être largement appliquées. Le groupe de travail de l'OCDE sur les nanomatériaux manufacturés (WPMN) a élaboré une description de travail pour les matériaux avancés¹⁰, sur la base de laquelle les questions de sécurité chimique et de durabilité sont abordées. Des exemples de matériaux avancés peuvent également être trouvés dans Giese et al. 2020¹¹.

2 Matériaux avancés dans le domaine de la tension entre climat, protection de l'environnement et de la santé et économie circulaire

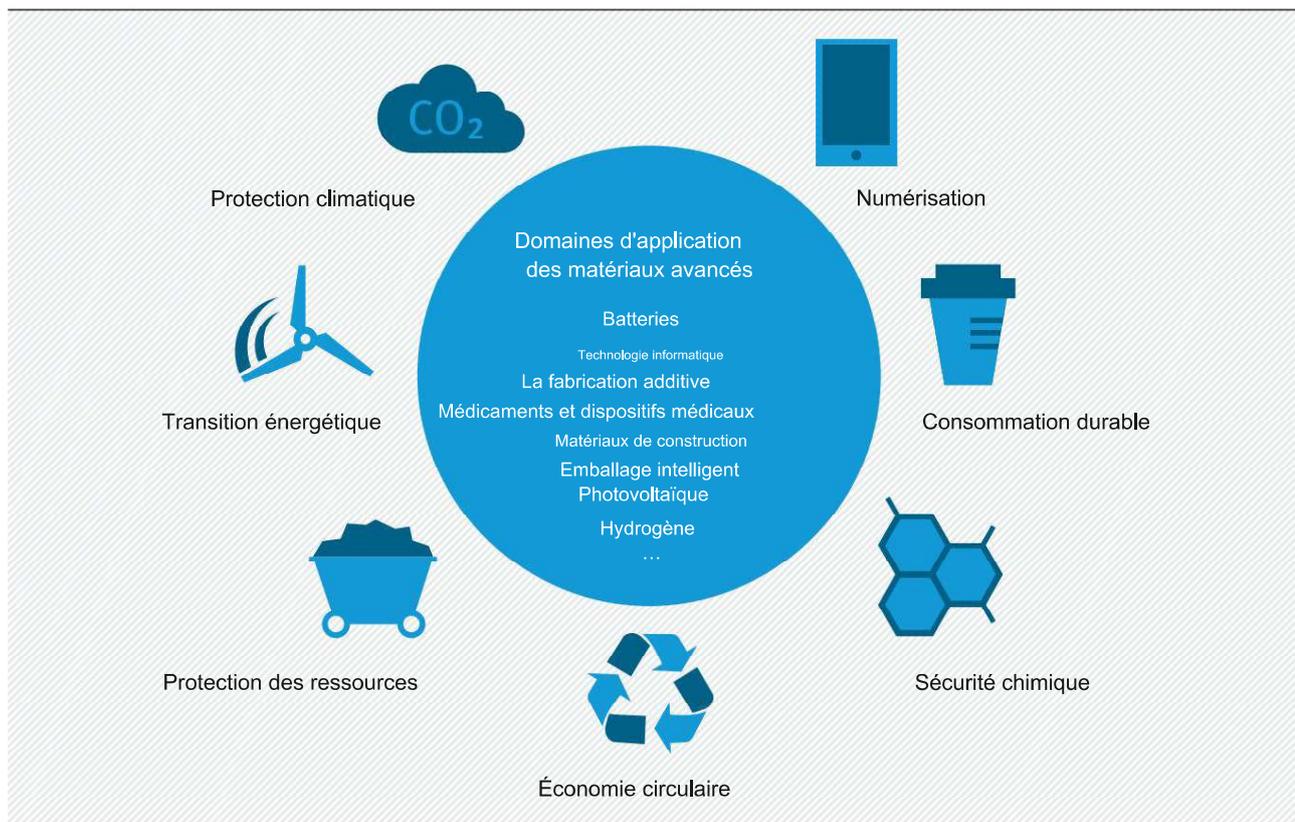
La transformation durable de la société poursuit l'objectif non seulement de réduire les émissions de CO₂, mais également de relever les défis du changement climatique, de la perte de diversité et des ressources et de la charge croissante des substances chimiques, en les évitant et en atténuant leurs conséquences négatives. Les mesures prises pour atteindre cet objectif doivent relever tous les défis mentionnés. Celles-ci sont étroitement liées et interdépendantes, de sorte qu'il n'est pas opportun d'essayer de résoudre une seule tâche et ainsi de perdre de vue les autres ou de les considérer comme subordonnées. Relever ces défis peut conduire à des objectifs contradictoires. Néanmoins, ces objectifs contradictoires n'existent pas entre les défis mondiaux eux-mêmes, mais peuvent survenir entre les mesures individuelles de solution.

Afin de relever les défis susmentionnés, il convient de trouver des moyens de modifier les systèmes sociétaux de manière à ce qu'ils soient compatibles avec la protection de l'environnement, de la santé et du climat¹². Non seulement les techniques et les processus de production doivent être reconsidérés, mais aussi les modes de consommation et les modes de vie. Cela nécessite une approche immédiate et concertée, impliquant différents domaines politiques et acteurs de la société dans son ensemble, afin de permettre un changement systémique.

Les matériaux avancés jouent un rôle important dans une transformation durable. Dans une grande variété de domaines d'application (Figure 2), leur utilisation peut aider, par exemple, à utiliser l'énergie plus efficacement, à économiser les ressources et à réduire, voire remplacer, l'utilisation de produits chimiques problématiques ou moins durables. Cependant, leur utilisation est liée à des questions sur la sécurité chimique et la durabilité de leur application tout au long du cycle de vie.

Figure 2

Domaines d'application des matériaux avancés pertinents pour les différents sujets de l'Agence allemande de l'environnement



propre illustration, Agence allemande pour l'environnement

Le chapitre 2 montre les avantages possibles ainsi que les défis attendus de l'utilisation de matériaux avancés dans d'importants domaines d'action pertinents pour l'environnement et décrit les zones de tension à l'aide d'exemples sélectionnés. Les références utilisées pour l'article décrivent des matériaux avancés et leurs applications potentielles qui sont déjà sur le marché, mais aussi ceux pour lesquels il n'a pas été clarifié de manière concluante s'ils peuvent réellement être commercialisés avec succès à l'avenir. Il n'est pas toujours possible non plus de décrire les avantages réels des matériaux et de leurs applications ou l'ampleur réelle d'un risque potentiel sur la base de la situation actuelle des informations.

2.1 Matériaux avancés dans le contexte de l'environnement et de la santé

La combinaison de substances et/ou de matériaux (actifs) existants ou nouveaux permet de produire des matériaux avancés avec des fonctionnalités ou des propriétés améliorées ou jusqu'alors inédites. Cela rend possibles de nouvelles formes d'application et de thérapie ainsi que des solutions techniques. De plus, selon le matériau, les effets souhaités peuvent être provoqués par la structure des matériaux, à la place ou en plus d'un effet chimique. Ainsi, les matériaux avancés offrent un certain nombre d'opportunités possibles pour la protection de l'environnement et la santé humaine. Ceux-ci incluent, mais ne sont pas limités à :

La réduction de l'utilisation de produits chimiques et donc de l'introduction de substances dans l'environnement grâce à une utilisation plus ciblée, une dose plus faible et une efficacité plus élevée et donc moins d'effets indésirables sur l'homme et l'environnement.

Amélioration de la protection de l'environnement et de la santé grâce à la mise à disposition de techniques et de procédés nouveaux ou améliorés utilisant des matériaux avancés, tels que la séparation, l'absorption ou la catalyse pour le traitement de l'eau (potable)¹³, pour l'élimination des polluants¹⁴ et pour l'analyse et le diagnostic environnementaux¹⁵ ; développement de soi-disant textiles intelligents¹⁶ pour, par exemple, la gestion de la santé.

Le remplacement de substances préoccupantes d'un point de vue environnemental et sanitaire ou dont l'utilisation n'est pas durable (par exemple, celles qui nécessitent des ressources élevées, un potentiel de réchauffement climatique élevé, un potentiel de transport longue distance élevé, une faible recyclabilité), mais aussi la réalisation de nouveaux procédés techniques ou de chaînes de valeur modifiées (par exemple, des alternatives sans produits chimiques, un comportement de consommation plus durable), qui peuvent être rendues possibles par des matériaux avancés.

Cependant, l'utilisation de matériaux avancés peut également entraîner des risques inconnus ou accrus pour l'environnement et la santé.

Sont envisageables dans ce contexte :

L'exposition environnementale à de nouvelles substances ou de nouvelles formes d'une substance (par exemple en tant que composants dits de matériaux avancés) aux propriétés inconnues ou une exposition environnementale accrue ou modifiée à des substances problématiques connues (problématiques, par exemple en ce qui concerne la persistance, mobilité, potentiel de bioaccumulation ou toxicité).

De nouvelles formulations et combinaisons qui l'utilisation de substances (éco)toxiques (actives) possible en premier lieu.

Augmenter l'empreinte écologique et/ou détériorer d'autres critères de durabilité, par exemple si la production d'un matériau avancé a un potentiel de réchauffement global plus élevé ou nécessite une utilisation plus importante de matières premières que celle du matériau ou de la substance traditionnellement utilisé¹⁷.

Bases d'évaluation manquantes ou inappropriées (par exemple, lignes directrices d'essai de l'OCDE, scénarios ou modèles d'exposition).

Lacunes ou exceptions dans les exigences d'exister des concepts réglementaires qui, par conséquent, conduisent à la situation où les dangers et les risques ne peuvent pas être identifiés, décrits ou traités de manière adéquate.

EXEMPLE - Systèmes de support avancés pour les formulations d'ingrédients actifs

Les systèmes de transport avancés sont utilisés pour le transport contrôlé et la protection d'une substance (cargaison), par exemple un ingrédient actif. Différents types de matériaux ou leurs combinaisons peuvent servir de supports. Jusqu'à présent, des micelles, des liposomes, des (bio-)polymères, des dendrimères, des hydrogels, du dioxyde de silicium poreux, des structures organométalliques (MOF), des origamis d'ADN, des fibres électrofilées ou des supports à base de carbone ont été décrits¹⁸. Ces possibilités se traduisent par de nombreux domaines d'application (potentiels) en médecine, mais aussi dans les cosmétiques, les pesticides et les biocides. En médecine, une grande variété d'applications sont possibles, comme pour le cancer ou les anti-inflammatoires. Les hormones, les enzymes ou les acides nucléiques (par exemple, l'ARNm, l'ARNsi) peuvent également être conditionnés, protégés et transportés vers la destination de cette manière. Les systèmes porteurs ont acquis une plus grande notoriété grâce à l'utilisation de nanoparticules lipidiques comme véhicules pour Vaccins à ARNm COVID-19.

Au moyen du système de transport, divers avantages peuvent être obtenus, tels qu'une biodisponibilité améliorée de la cargaison, la protection de la cargaison contre le métabolisme / la dégradation prématurée ou le contrôle de la libération de la cargaison à un certain moment à un certain endroit. Ce dernier peut être fait via un stimulus, tel que des conditions environnementales changeantes (p. ex. pH, température, rayonnement). De cette manière, un transport ciblé et plus efficace, par exemple, d'ingrédients actifs vers le site de l'effet souhaité peut avoir lieu. En outre, de nouveaux mécanismes d'action auparavant inaccessibles (par exemple, des mécanismes d'action mécaniques à petite échelle) de la cargaison peuvent être rendus utilisables. D'autres avantages possibles qui profitent à la santé humaine et à la

l'environnement comprennent le traitement et la prévention de maladies jusqu'ici difficiles à traiter, une utilisation globalement moindre d'ingrédients actifs et donc une réduction de l'exposition potentielle de l'homme et de l'environnement ou la réduction des effets indésirables (environnementaux)

Effets secondaires.

La recherche et le développement sur les systèmes porteurs ne cessent d'augmenter depuis des années. Les produits déjà développés entrent de plus en plus sur le marché¹⁹. Cependant, il manque une vue d'ensemble suffisante des divers systèmes de support qui seront effectivement utilisés (à l'avenir) et des domaines d'application qui seront concernés. Compte tenu des domaines d'application connus et présumés tels que les produits pharmaceutiques et les dispositifs médicaux, les produits phytopharmaceutiques et les cosmétiques, éventuellement aussi les biocides et les denrées alimentaires et les aliments pour animaux, cela est particulièrement important pour pouvoir déduire correctement le besoin d'adaptation des évaluations des risques environnementaux pour les domaines réglementaires concernés. À cet égard, des questions se posent dans quelle mesure les différents systèmes de transport influencent le comportement et les effets environnementaux de la cargaison réelle et si les méthodes d'essai existantes sont appropriées pour déterminer le comportement et les effets environnementaux du système global et les «éléments constitutifs» à partir desquels ils sont construits.

Des connaissances pertinentes doivent être acquises et intégrées dans une évaluation environnementale appropriée, comme l'environnement actuel méthodes d'évaluation environnementale des matériaux avancés et les combinaisons matière-ingrédient actif présentent des lacunes importantes ou sont inexistantes²⁰.

2.2 Matériaux avancés – Conservation des ressources

et économie circulaire L'utilisation de matériaux avancés dans divers produits ouvre un large éventail d'opportunités pour la conservation des ressources, la réutilisation et le recyclage des produits :

Amélioration de l'efficacité grâce à de nouveaux et im processus de production éprouvés avec une consommation de ressources moindre ou une production réduite de déchets industriels, par exemple grâce à de nouveaux catalyseurs²¹ ou à l'utilisation plus ciblée de produits chimiques/ingrédients actifs.

Réalisation de nouveaux procédés (ex.

la fabrication comme l'impression 3D ou l'électrofilature²², la production d'électronique imprimée²³), qui permettent de nouvelles formes de valeur ajoutée et de production décentralisée, ainsi que la réparation ou la traçabilité des produits.

Augmentation de la durabilité des produits en améliorant la résistance aux intempéries et à l'abrasion, par exemple des revêtements, ou en les protégeant contre la corrosion, l'humidité et les infestations²⁴.

EXEMPLE – Fabrication additive dans le contexte des flux de matières, de l'utilisation des ressources, des déchets et de la protection de l'environnement et de la santé

La fabrication additive, familièrement souvent appelée impression 3D, décrit des processus de fabrication dans lesquels les composants sont construits couche par couche à partir d'un (ou plusieurs) matériau(x) de départ. Cela ouvre un large éventail de possibilités pour la production de matériaux composites complexes ou de nouvelles conceptions, telles que la conception de structures géométriquement complexes qui ne sont pas réalisables avec les procédés de fabrication soustractifs conventionnels.

La fabrication additive comprend une grande variété de processus qui deviennent de plus en plus importants. Ils sont utilisés dans une grande variété d'industries, mais sont également de plus en plus utilisés par les utilisateurs professionnels, les consommateurs et dans le secteur de l'éducation²⁵. Selon la méthode utilisée, les matières premières typiques pour la fabrication additive sont les métaux liquides, pulvérulents et solides, les céramiques, les polymères et les résines synthétiques, mais aussi le béton, le ciment ou le bois. La fabrication additive est utilisée pour la production de modèles, d'échantillons et de prototypes, mais aussi pour des composants, des outils et des produits finis sur mesure pour un large éventail d'applications²⁶. Celles-ci vont des dispositifs médicaux aux cellules solaires et aux bâtiments. Un autre développement de l'impression 3D est l'impression 4D, qui permet la production de matériaux à mémoire de forme, de matériaux auto-cicatrisants, etc.

appelés métamatériaux²⁷. La quatrième dimension fait référence à temps, car ces matériaux ont la capacité de modifier leurs propriétés par un stimulus externe.

Les possibilités d'exploitation décentralisée promettent des coûts de transport et de stockage réduits. La fabrication additive offre la possibilité de rendre plus facilement disponibles des composants ou des pièces de rechange, ce qui prolonge la capacité de réparation et donc la durée de vie des produits et incite à adopter des modèles commerciaux produit-service. Autre

Les avantages associés à la fabrication additive sont la production de produits avec moins de déchets et de besoins énergétiques ou l'utilisation pour la construction légère.

En raison de la durée de vie accrue du produit, les ressources et l'énergie peuvent être économisées²⁸.

Néanmoins, la fabrication additive pose un défi à la sécurité chimique et à la durabilité²⁹ car les matières premières peuvent contenir des substances dangereuses et la composition exacte peut ne pas être spécifiée³⁰. Pendant le processus d'impression, des composés organiques volatils, des composés solides (à l'échelle nanométrique), des plastifiants, des retardateurs de flamme et des monomères peuvent être libérés³¹. Des émissions dans l'air ou les eaux usées sont également envisageables lors des processus de post-traitement tels que le polissage, le ponçage et le nettoyage du produit imprimé. Il existe des questions ouvertes concernant la durabilité des produits imprimés, telles que la stabilité mécanique pendant la phase d'utilisation ou la libération de composants dans l'environnement.

En raison de la diversité des produits imprimés et de leurs applications, mais aussi en raison de la complexité de la structure et de la composition des produits imprimés, et du manque de transparence à leur sujet, il n'est actuellement pas clair comment la collecte, le traitement et le recyclage des déchets de produits imprimés peuvent être réalisés. La fabrication additive a un besoin énergétique élevé qui varie selon les processus individuels et également selon le domaine d'application ; par rapport aux méthodes de production conventionnelles, les besoins en énergie peuvent être inférieurs. Avec les avantages de la fabrication additive, la probabilité d'effets rebond augmente également si les possibilités d'utilisation incitent à une consommation inutile.

Cependant, l'utilisation de matériaux avancés peut également conduire à une utilisation accrue des ressources dans des compositions complexes. Cela pose les défis suivants :

La production de matériaux avancés peut s'accompagner de l'utilisation de nouvelles matières premières ou d'une consommation accrue de matières premières³² dont l'extraction n'est pas durable ou qui entraîne de nouvelles dépendances aux matières premières.

La complexité et la variété croissantes des annonces matériaux avancés, mais aussi l'utilisation diffuse de matières premières pour leur production, complique encore la traçabilité, l'évaluation des risques et l'économie circulaire (réemploi, recyclage) ; cela peut également conduire à des processus de recyclage de plus en plus lourds en produits chimiques et énergivores. C'est une conséquence indésirable, surtout si des combustibles fossiles sont utilisés à cette fin. De plus, les matériaux avancés peuvent perturber physiquement le processus de recyclage ou entraîner l'accumulation de substances problématiques.

Travailler avec et sur les déchets est risqué en raison de leur imprévisibilité et de la composition fluctuante des déchets : comme indiqué précédemment pour les plastiques renforcés de fibres de carbone³³, le traitement des déchets de matériaux avancés peut entraîner des risques pour les travailleurs et l'environnement, par exemple par libération de composants problématiques lors de la récupération.

L'apparition d'effets de rebond : en raison des améliorations de l'efficacité décrites ci-dessus, il est concevable que l'offre et la demande de certaines applications augmentent, ce qui conduit à une situation où les économies réalisées par l'utilisation (par exemple, apport environnemental de produits chimiques, gaz à effet de serre) gaz, ressources) sont partiellement annulés. Dans ce contexte, l'utilisation de matériaux de pointe est également envisageable, qui n'apporte aucun avantage technique, mais sert surtout à lancer de nouveaux produits sur le marché de manière publicitaire efficace.

2.3 Matériaux avancés pour la protection du climat et la

transition énergétique Pour la transition énergétique et la protection du climat, les matériaux économes en ressources sont tout aussi importants que les innovations matérielles qui permettent des solutions techniques pour la production d'énergie renouvelable et le stockage de l'énergie.

L'utilisation de matériaux de pointe vise à augmenter l'efficacité, à contribuer à la longévité et aux économies d'énergie.

Les domaines d'application suivants sont destinés à soutenir la protection du climat et la transition énergétique :

Des matériaux avancés sont en recherche et développement pour être utilisés dans des techniques de production d'énergie renouvelable (par exemple pour la production de panneaux solaires³⁴ et d'éoliennes³⁵) ou pour la production d'hydrogène vert³⁶, ainsi que pour le stockage d'énergie³⁷ et pour rendre ces techniques plus efficaces.

Les matériaux avancés contribuent à rendre les procédures et les processus (par exemple les catalyseurs³⁸, la construction légère) plus économes en énergie. Cette conception s'étend au développement de textiles dits intelligents pour la production d'énergie³⁹.

Dans le secteur de la construction, des matériaux avancés sont utilisés pour réduire la consommation d'énergie dans les bâtiments (par exemple comme matériau d'isolation⁴⁰ ou dans les vitres pour réguler le rayonnement lumineux et thermique⁴¹).

Cependant, l'utilisation de matériaux avancés dans les techniques favorisant la protection du climat et la transition énergétique entraîne également des défis, des risques et des questions ouvertes. Ceux-ci incluent :

La production de matériaux avancés pour les technologies de transition énergétique inclut souvent l'utilisation de substances problématiques pouvant entraîner une exposition des travailleurs et de l'environnement, notamment lors de la production et en fin de vie du produit ou lors du traitement des déchets.

Il y a souvent un manque de méthodes et de concepts de collecte pour le recyclage afin de récupérer les matériaux utilisés à partir d'applications techniques.

L'utilisation de matériaux avancés pour les technologies de la transition énergétique entraîne une modification de la demande de matières premières, qui entraîne des impacts environnementaux nouveaux ou modifiés (ex : apport de substances problématiques dans l'environnement, consommation de terres) et des dépendances.

EXEMPLE – Stockage d'énergie électrochimique pour la transition énergétique

La demande de systèmes de stockage d'énergie électrochimique (familièrement : batteries) augmente dans le monde entier. Ils sont utilisés pour le stockage stationnaire et mobile de l'énergie pour les smartphones, les ordinateurs portables, les vélos électriques, les voitures électriques ou comme stockage intermédiaire de l'énergie solaire. Avec la numérisation et l'électrification croissantes de la vie quotidienne, de nouvelles applications sont constamment ajoutées. Les systèmes de stockage d'énergie électrochimique jouent un rôle important dans la transition énergétique, car ils permettent de stocker l'énergie issue de sources renouvelables non stockables (solaire, éolien) et de la rendre disponible ultérieurement. Les nouveaux dispositifs de stockage d'énergie électrochimique sont des systèmes divers et complexes utilisant une variété de matériaux. L'objectif du développement ultérieur des systèmes de stockage d'énergie électrochimiques est avant tout d'augmenter leurs performances et leur durée de vie, de réduire les coûts de production et d'éviter les incidents. Les matériaux avancés jouent un rôle important dans la fourniture de matériaux d'électrode, de membranes pour la séparation ou le transfert de charge ou de matériaux d'électrolyte⁴².

Effets environnementaux potentiels de l'énergie électrochimique

Les systèmes de stockage ne peuvent pas être décrits en général. Ils dépendent du système de batterie respectif, du cycle de vie considéré et des possibilités de recyclage⁴³. Un enjeu particulier pour la protection de l'environnement mondial est l'énorme augmentation de la demande de métaux critiques en raison de l'évolution du marché des piles, notamment si leur extraction est associée à un manque de normes environnementales et sociales⁴⁴. Le recyclage des systèmes de stockage d'énergie est très complexe, mais écologiquement plus avantageux que l'utilisation de matières premières primaires. La rentabilité du recyclage dépend du volume de piles usagées et du prix des matériaux recyclables. La longue phase d'utilisation souhaitable rend toutefois difficile la mise en place de stratégies de recyclage. L'utilisation secondaire des batteries lithium-ion (LIB), par exemple via le stockage stationnaire d'énergie solaire par des batteries de voiture usagées, conduit à une meilleure utilisation de leur capacité de stockage, mais peut rendre le recyclage encore plus difficile, car la phase d'utilisation est plus longue.

des matériaux étendus et donc recyclables sont disponibles avec un délai supplémentaire⁴⁵. Le développement rapide de l'électrode matériaux rend également difficile l'établissement d'un état des l'art pour le recyclage. Par exemple, il existe encore un besoin considérable de recherche sur le recyclage des systèmes de stockage d'énergie électrochimique et de leurs composants. Pour un grand nombre de techniques ou de sous-systèmes, il n'existe pas actuellement de concepts de recyclage et de réutilisation suffisamment satisfaisants d'un point de vue écologique.

Les substances et matériaux utilisés pour l'électrochimie

Le stockage de l'énergie pose un défi pour la sécurité des produits chimiques et des installations, en particulier lors de la production et du recyclage, mais aussi dans le contexte d'une utilisation et d'une élimination inappropriées ou aux dysfonctionnements et aux accidents. Matériaux d'électrode con certains métaux (éco-)toxiques tels que le cobalt, le chrome, le cuivre, le nickel, le thallium et l'argent⁴⁶. En ce qui concerne le LIB, la production de cathodes est basée sur l'utilisation de polymères contenant du fluor tels que le difluorure de polyvinylidène et le solvant toxique et mutagène N-méthyl-2-pyrrolidone. La recherche sur les liants hydrosolubles et sans fluor est prometteuse, mais un domaine jusqu'ici peu étudié⁴⁷. Études montrent que le vieillissement du LIB conduit à une décomposition de l'électrolyte, qui par la suite conduit à la formation d'organofluorophosphates toxiques⁴⁸. La formation de fluorure d'hydrogène et d'acide phosphorique est également possible lors de l'ouverture d'une batterie vieillissante (par exemple suite à un accident ou lors du recyclage). Les LIB se caractérisent par une densité d'énergie élevée. En cas de dommages mécaniques, d'impacts thermiques ou d'un stockage inapproprié, l'énergie stockée dans la cellule peut être libérée de manière explosive.

3 Pierres angulaires pour des innovations matérielles sûres et durables

Les matériaux avancés peuvent contribuer à bien des égards au bien-être sociétal et aux solutions nécessaires pour relever les défis mondiaux tels que la transition énergétique, les concepts de mobilité durable ou la protection de la santé. Cependant, la façon dont les matériaux avancés sont fabriqués, utilisés et éliminés, ainsi que les impacts négatifs potentiels de leurs propriétés inhérentes, peuvent également contribuer à l'aggravation des crises environnementales majeures que sont le changement climatique, la perte de ressources, la perte de biodiversité et la pollution. De plus, tous les matériaux avancés ou leurs applications ne peuvent pas avoir un avantage sociétal. Une approche holistique doit donc être poursuivie, qui d'une part permette l'utilisation de ces matériaux dans des applications favorisant un avenir durable, mais d'autre part assure également la sécurité et la durabilité de ces matériaux et de leurs applications tout au long de leur cycle de vie.

Il faut s'attendre à ce que des objectifs contradictoires surgissent, par exemple dans le cas de l'utilisation inévitable de matériaux avancés potentiellement nocifs pour les (nouvelles) technologies à fort avantage social (par exemple lorsqu'elles sont utilisées pour les énergies renouvelables). Par conséquent, il est important de développer des approches qui permettent d'équilibrer l'utilisation de matériaux avancés pour lutter contre les crises majeures de notre époque et leur sécurité chimique ou leur durabilité éventuellement limitée sur le cycle de vie. Cela implique également d'identifier les objectifs contradictoires à un stade précoce, et de dériver et de mettre en œuvre des mesures en temps opportun.

Début 2022, UBA, en collaboration avec le Institut fédéral pour l'évaluation des risques (BfR) et le Institut fédéral pour la sécurité et la santé au travail (BAuA), ont publié des premières recommandations sur la gouvernance des risques des matériaux avancés du point de vue de la sécurité chimique⁴⁹ :

Gouvernance des risques des matériaux avancés

Afin de faciliter un échange de points de vue et d'informations entre les différentes parties prenantes concernées, UBA a organisé une série de conférences thématiques internationales sur la sécurité et la durabilité des matériaux avancés et leurs applications de 2019 à 2021. Sur cette base, les trois autorités fédérales supérieures UBA, BAuA et BfR ont développé une perspective commune sur la gouvernance des risques de matériaux avancés. Celui-ci comprend cinq domaines d'action importants :

- Systèmes d'alerte précoce pour identifier les matériaux et les applications préoccupants
- Révision et adaptation de la réglementation sur les produits chimiques
- Développement et mise en œuvre de méthodes de surveillance et de outils d'évaluation des risques
- Promotion de Safe-&Sustainable-by-Design pour les matériaux avancés
- Communication et mise en réseau
- Recherche interdisciplinaire (recherche préparatoire et réglementaire)

En outre, BAuA, BfR et UBA fournissent des recommandations d'action sur les polymères avancés, la fabrication additive, les fibres, les emballages intelligents et les nanoparticules. Depuis lors, la discussion sur les matériaux avancés dans le cadre de ces domaines d'action a continué au niveau national et international. Entre autres, depuis 2021, il existe un groupe de travail interinstitutions sur les matériaux avancés en Allemagne. Depuis 2021, un groupe de pilotage au sein du groupe de travail de l'OCDE sur les nanomatériaux manufacturés se penche sur les matériaux avancés et les questions de leur sécurité, de leur durabilité et de leur évaluation appropriée.

Les domaines d'action mentionnés dans la perspective interagences sur la gouvernance des risques sont pertinents pour tous les objectifs de protection et sont donc également importants pour l'examen des mesures nécessaires à la sécurité et à la durabilité des matériaux avancés d'un point de vue environnemental (pour plus de détails sur les domaines mentionnés, veuillez vous référer au document).

De plus, il existe d'autres points clés pour soutenir l'utilisation sûre et durable des matériaux avancés, qui sont énoncés ci-dessous :

Liens dans la stratégie de l'UE sur les produits chimiques pour la durabilité

Bien que les matériaux avancés ne représentent pas un objectif particulier de la stratégie de la Commission européenne sur les produits chimiques pour la durabilité, les initiatives annoncées dans cette stratégie conviennent à la promotion de mesures pour la sécurité et la durabilité des matériaux avancés. Avec une réforme des réglementations relatives aux substances, la Commission européenne vise à développer davantage le cadre juridique et à créer une meilleure base d'informations. Cela concerne, par exemple, l'introduction d'obligations supplémentaires pour l'enregistrement de certains polymères dans le cadre du règlement REACH.

Dans le cadre de la stratégie de l'UE sur les produits chimiques pour la durabilité, des critères techniques et des indicateurs pour le concept «Sûr et durable dès la conception» (SSbD) sont en cours d'élaboration⁵¹. SSbD fait référence aux instruments directeurs de la chimie verte et durable et vise à orienter l'innovation vers une transformation industrielle plus durable. À cet égard, l'objectif est de remplacer ou au moins de minimiser la production et l'utilisation de substances et de matériaux préoccupants, ainsi que de réduire l'impact sur le climat et l'environnement tout au long du cycle de vie des produits chimiques et des matériaux.

La Commission européenne prévoit également d'intégrer davantage le SSbD dans le financement de la recherche et de l'innovation. En outre, la Commission européenne envisage de reprendre les aspects correspondants dans la réglementation. Des aspects partiels du SSbD sont déjà en cours de discussion dans les processus législatifs pour le futur règlement européen sur les batteries et le règlement européen sur l'écoconception. Il n'est pas encore clair si les aspects correspondants seront également pris en compte dans le développement ultérieur de la législation de l'UE sur les produits chimiques. En principe, ces procédures législatives offrent la possibilité d'ancrer ces aspects dans la loi.

L'amélioration de la coopération entre les agences de l'UE dans le cadre de l'approche « une substance, une évaluation »⁵² visée dans la stratégie de l'UE en matière de produits chimiques pour la durabilité, et la meilleure interaction souhaitée des réglementations relatives aux substances peuvent également aider à identifier les risques plus tôt. Cela s'applique également à la création prévue d'un système général d'alerte précoce pour les produits chimiques. La Commission européenne souhaite commencer

activités à cet égard en 2023. Jusqu'à présent, une étude de concept est disponible, mais la conception concrète est encore ouverte⁵³.

Afin de garantir des flux circulaires sans polluants, les produits chimiques et matériaux problématiques dans les produits doivent généralement être évités. Étant donné que les matériaux avancés contiennent souvent aussi des métaux précieux et des matières premières critiques qui sont perdues lors du traitement conventionnel des déchets, les processus de traitement pour le recyclage pour les différentes filières de déchets doivent être rendus possibles. Pour rendre cette optimisation possible, il faut savoir quels matériaux sont à prévoir dans quels déchets, également au-delà de la phase d'innovation et de développement.

De plus, il doit être économiquement intéressant de récupérer des matériaux en faible quantité ou difficiles à détacher des matériaux composites. Des passeports de produits numériques avec des normes d'information appropriées pourraient soutenir la transparence nécessaire à l'optimisation des processus de traitement des déchets de matériaux avancés. La Commission européenne a proposé un cadre juridique pour la conception de passeports numériques de produits dans le cadre de l'initiative Produits durables⁵⁴. En outre, l'OCDE a présenté des passeports de produit numériques, qui contiennent des informations sur la réparation, la réutilisation et le recyclage⁵⁵. En plus de diverses informations sur la production, l'entretien, le démantèlement et le recyclage, ces passeports pourraient également contenir des informations sur les substances de valeur et les polluants.

Fondamentalement, ces initiatives sont un pas dans la bonne direction. Cependant, cela ne garantit pas automatiquement que les particularités des matériaux avancés soient suffisamment prises en compte. C'est particulièrement le cas lorsque les approches choisies ne considèrent principalement que des défis connus. Par exemple, l'identification et l'évaluation appropriée d'éventuels risques divergents dus à différentes formes d'une substance mais aussi de risques complètement nouveaux par des innovations matérielles doivent être assurées.

Il reste également ouvert si la transformation de la société et des entreprises vers la durabilité peut être réalisée avec les initiatives prises et annoncées par la Commission européenne.

Vraisemblablement, il sera nécessaire de créer de nouvelles incitations et spécifications pour réaliser une transformation aussi complète mais nécessaire.

Renforcer les approches de la chimie verte et durable La deuxième édition du Global Chemicals Outlook GCO-II (UNEP, 2019⁵⁶) montre de manière impressionnante que la capacité de production et les ventes de l'industrie chimique doublent tous les 15 ans. Dans le même temps, le nombre de nouveaux produits chimiques augmente. La diversité et la diffusion des utilisations et des combinaisons chimiques augmentent également, ce qui se reflète également dans les développements dans le domaine des matériaux avancés. Dans ce contexte, il est nécessaire de développer des solutions axées sur la durabilité pour les matériaux avancés. D'une part, ceux-ci doivent répondre aux besoins humains et contribuer à un niveau suffisant de prospérité et de développement durable dans le monde. D'autre part, ils ne doivent pas alourdir ou dépasser les limites planétaires.

La communauté mondiale n'a pas atteint l'objectif ambitieux d'une gestion rationnelle des produits chimiques⁵⁷ fixé pour 2020⁵⁸. Pourtant, les analyses critiques indiquent également qu'il existe de nombreux instruments, outils et solutions adaptés. Cependant, ceux-ci doivent être mis en œuvre de toute urgence de manière encore plus intensive qu'auparavant et étendus par une action mondiale plus ambitieuse de toutes les parties prenantes (« le statu quo n'est pas une option »⁵⁹).

Le développement durable de la chimie, de la chimie et des matériaux avancés nécessite une approche politique globale et des critères techniques cohérents. En plus du SSbD, il existe déjà de nombreuses approches sur la façon dont les produits chimiques et les matériaux avancés doivent être produits, consommés et utilisés de manière plus durable :

En 1998, Anastas et Warner ont décrit le Douze principes de la chimie verte⁶⁰. Celles-ci ne sont pas seulement importantes pour la synthèse de produits chimiques, mais ont également donné une nouvelle urgence à une chimie responsable.

Dans un atelier international sur le développement durable chimie en 2004, l'UBA et l'OCDE ont élaboré des critères détaillés pour une chimie durable qui combinent les aspects écologiques, sociaux et économiques de la durabilité en chimie⁶¹.

En 2020, l'UNEP Initiative for Green and Sustainable Chemistry a postulé dix objectifs et principes directeurs pour une chimie verte et durable dans le cadre du manuel du cadre vert et durable du PNUE⁶². Ils vont de la conception moléculaire à la garantie que l'utilisation de produits chimiques pour répondre aux besoins sociétaux est exempte de pollution ou d'autres impacts négatifs. À cet égard, le PNUE fournit un plan directeur pour aligner les innovations en chimie sur la durabilité.

En plus des efforts du PNUE, le Centre international de collaboration pour une chimie durable (ISC3) ⁶³ a développé les dix caractéristiques clés de la chimie durable ⁶⁴ dans le cadre d'un processus avec les parties prenantes en 2020. Celles-ci élargissent la perspective du PNUE pour inclure des principes généraux de durabilité tels que la suffisance, la cohérence, l'efficacité et la résilience. La précaution et le respect des limites planétaires sont des principes fondamentaux. La chimie est considérée comme un atout scientifique et économique qui englobe les chaînes d'approvisionnement et l'ensemble du cycle de vie. Par conséquent, les dix caractéristiques clés de la chimie durable visent à créer de nouvelles opportunités économiques qui ne sont pas uniquement axées sur le profit et la croissance.

De plus, il existe différentes pratiques et instruments pour accélérer et mettre en œuvre plus de durabilité. Les systèmes d'évaluation rassemblés dans la boîte à outils d'évaluation des substitutions et des alternatives de l'OCDE⁶⁵ concernent principalement la prévention et la gestion des propriétés dangereuses. Certains instruments incluent une vision plus large de la durabilité, comme le guide UBA sur les produits chimiques durables⁶⁶ et l'outil informatique associé SubSelect⁶⁷. Des modèles commerciaux innovants et axés sur la durabilité, tels que le leasing chimique, complètent ces instruments dans la pratique.

Dans le cadre de ses travaux sur le concept de promotion de l'innovation sûre et durable des nanomatériaux et autres matériaux avancés, le WPMN de l'OCDE a publié ses descriptions de travail des termes durabilité et sûr et durable dès la conception⁶⁸.

Comme contribution supplémentaire pour stimuler la discussion dynamique, UBA a organisé sa deuxième conférence internationale sur la transformation durable en novembre 2021 intitulée « Transformation socio-écologique : production, utilisation et gestion des produits chimiques pour servir les personnes sans polluer la planète ».

À la fin de la conférence, UBA a résumé six objectifs principaux, tous liés à la production et à l'utilisation durables des produits chimiques⁶⁹ :

1. Préférence pour les substances qui ne causent aucun dommage à la santé et à l'environnement.
2. Les substances dangereuses ne peuvent être utilisées que si elles sont absolument dans l'intérêt de la société et du développement durable et s'il n'existe pas d'alternative.
3. L'économie circulaire exige flux de matières.
4. Une mesure durable de la demande de la société en produits chimiques, y compris une consommation durable d'énergie et de ressources.
5. Les produits chimiques doivent atteindre la neutralité climatique tout au long de leur cycle de vie.
6. Critères et indicateurs de durabilité clairs dans afin de rendre transparents les processus d'équilibrage et d'atteindre les objectifs de l'Agenda 2030 pour le développement durable.

Ces objectifs représentent un résumé de la chimie verte et durable et s'adressent à tous les acteurs et secteurs utilisateurs de produits chimiques. Malgré ces efforts fructueux, il est important de développer davantage ces approches pour renforcer le développement durable et la transformation de la chimie, de la chimie et des matériaux avancés, et de les appliquer plus qu'auparavant, ainsi que d'établir et de diffuser d'autres solutions pour transformation durable.

Sensibiliser et développer les connaissances

La transformation vers une sécurité chimique et une durabilité accrues n'est souvent pas suffisamment prise en compte dans la phase d'innovation de la recherche sur les matériaux. Cela est dû, entre autres, au fait que la recherche sur les matériaux vise principalement à obtenir des fonctionnalités améliorées ou nouvelles afin de résoudre une tâche technique.

Néanmoins, des efforts croissants sont également déployés pour intégrer les aspects individuels de durabilité dans le développement de matériaux avancés et de leurs applications, à condition que la faisabilité d'une fonctionnalité soit généralement clarifiée et qu'il y ait une prise de conscience des propriétés problématiques d'un matériau ou d'une substance utilisée. Pour améliorer cette situation, il est nécessaire de promouvoir de manière inhérente la recherche et l'innovation de matériaux sûrs et durables. Pour cela, tous les domaines de la sécurité et de la durabilité doivent être pris en compte sur l'ensemble du cycle de vie et pas seulement sur des aspects partiels. Dans ce contexte, il est nécessaire de transmettre des connaissances aux développeurs de matériaux actuels et futurs sur l'impact des substances et des matériaux préoccupants sur les humains et l'environnement ainsi que sur leur durabilité. En outre, il est important de développer une expertise sur les approches et les exigences réglementaires parmi ces acteurs. Mais les institutions de financement doivent également disposer de l'expertise technique pour pouvoir évaluer les propositions de financement d'innovations matérielles en tenant compte des aspects de sécurité et de durabilité. Les offres initiales de renforcement des connaissances sur la sécurité des nanomatériaux sont par exemple fournies par divers projets achevés et en cours du NanoSafety Cluster⁷⁰ ou par le projet EU H2020 Nanomet⁷¹, qui se sont notamment donné pour mission de fournir du matériel d'information, d'enseignement et de formation. Ces initiatives doivent être reprises et élargies. Le projet EU Horizon Europe PARC⁷² peut y contribuer, qui, entre autres, mettra également en place une plate-forme de connaissances et d'informations ainsi que du matériel pédagogique sur la sécurité et la durabilité des produits chimiques et des matériaux. ISC3 promeut également le transfert de connaissances sur la chimie durable, notamment une plate-forme internationale de connaissances, un service mondial de démarrage, une université d'été pour la chimie durable et un réseau international. De cette manière, ISC3 promeut la transition vers une chimie durable par la collaboration, l'innovation, l'éducation, la recherche et l'échange d'informations.

Intégration de la sécurité et de la durabilité dans le processus d'innovation

Comme mentionné ci-dessus, le JRC a développé un concept SSbD qui intègre les aspects de la sécurité, de la recyclabilité et de la fonctionnalité des produits chimiques et des matériaux en tenant compte de la durabilité tout au long de leur cycle de vie et de la minimisation de leur empreinte environnementale. Cela signifie que des solutions, par exemple pour éviter l'utilisation de produits chimiques et de matériaux problématiques, la prévention des déchets, l'élimination sûre des déchets et la récupération optimale des matériaux recyclables, doivent déjà être envisagées dans la phase de développement et d'innovation des matériaux et de produits.

Afin de pouvoir évaluer l'empreinte écologique ou les éventuels risques matériels, en particulier des matériaux et produits chimiques nouveaux ou peu étudiés, une base de données appropriée basée sur le principe de données FAIR73 doit être créée. À son tour, la collecte de données nécessite des méthodes généralement acceptées qui conviennent pour évaluer correctement les matériaux avancés en ce qui concerne leur impact sur la santé humaine, l'environnement, leur recyclabilité ou leur empreinte écologique. Cela est nécessaire à la fois pour permettre aux développeurs de matériaux de vérifier si les critères SSbD sont remplis pour une innovation et pour garantir l'acceptation réglementaire lors de l'entrée sur le marché à une date ultérieure. Les méthodes d'évaluation généralement acceptées sont donc un élément important pour assurer le succès de l'innovation, également d'un point de vue économique. D'une part, ils offrent une sécurité juridique pour le respect des exigences en matière de données. D'autre part, comme dans le cas des lignes directrices de l'OCDE sur les tests, et sur la base de l'acceptation mutuelle des données, il peut être évité d'avoir à répéter inutilement des tests lors de l'entrée sur le marché dans d'autres pays membres de l'OCDE.

Cependant, une base de données complète est également nécessaire pour les décideurs et les autorités afin d'identifier les lacunes existantes dans les connaissances, les préoccupations ou les objectifs contradictoires, et de pouvoir en déduire et mettre en œuvre des mesures appropriées en conséquence.

Identifier les matériaux préoccupants à un stade précoce et combler les lacunes identifiées dans les connaissances et l'évaluation

Conformément au principe de précaution, il est nécessaire d'identifier rapidement les matériaux avancés qui suscitent des inquiétudes, que ce soit du point de vue d'un éventuel risque pour la santé ou l'environnement, durabilité ou couverture réglementaire insuffisante. Dans le cadre des systèmes d'alerte précoce, des matériaux avancés et de nouvelles applications préoccupantes peuvent être identifiés, des préoccupations peuvent être formulées, des lacunes dans les connaissances peuvent être reconnues et des besoins d'action peuvent être définis. Les actions recommandées peuvent inclure, d'une part, la collecte de données pour prouver ou réfuter la préoccupation exprimée, mais aussi le développement de méthodes pour l'évaluation appropriée des matériaux. Le résultat d'un système d'alerte précoce peut également fournir des recommandations pour une re-conception du matériau ou son application dans le sens du concept SSbD. Une proposition de système d'alerte précoce répondant aux préoccupations des (nano)matériaux avancés est disponible (Early4AdMa74), mais d'autres systèmes sont également envisageables pour l'application (The EU Foresight System - FORENV75). Cependant, la prise en compte des matériaux avancés dans les systèmes d'alerte précoce reste toujours une considération au cas par cas. La sélection des matériaux considérés, l'application du système, les résultats et les conclusions qui en résultent dépendront donc de la capacité, de l'expertise et de l'intérêt des personnes impliquées.

Pour combler les lacunes de l'évaluation, il convient également de tenir compte de l'impact des risques environnementaux sur la santé humaine. L'idée de l'approche One Health76 peut constituer la base d'une meilleure évaluation intégrative, par exemple des produits pharmaceutiques, et devrait également être prise en compte pour l'évaluation des risques des produits pharmaceutiques basés sur des matériaux avancés.

Développer une nouvelle compréhension de l'innovation

Pour parvenir à une société plus durable, il ne suffit pas d'examiner la sécurité et la durabilité des matériaux et des produits chimiques au cas par cas.

Cela nécessite une compréhension plus large de l'innovation qui, outre le progrès technique et la faisabilité économique, prend également en compte et contrecarre dès le départ les éventuels inconvénients pour l'environnement et la société. À cette fin, une approche holistique est nécessaire, par exemple pour réduire la consommation de produits chimiques et de matériaux ainsi que les ressources associées

la consommation et la production de gaz nocifs pour le climat grâce à des modèles commerciaux plus durables et à des changements dans le comportement général de consommation. Un dialogue sociétal global est nécessaire pour pouvoir appréhender les intérêts complexes, permettre le transfert de connaissances, identifier des alternatives et des mesures, et ainsi orienter l'innovation vers une plus grande durabilité.

Activités actuelles de UBA sur les matériaux avancés

Dialogue : Afin de rassembler les parties prenantes concernées et de stimuler une discussion approfondie sur les matériaux avancés et leurs défis pour la sécurité chimique, UBA a organisé des conférences thématiques internationales de 2019 à 2021 sur la nécessité d'agir sur les matériaux avancés dans le contexte de la sécurité chimique. UBA apporte la perspective environnementale sur les matériaux avancés dans les dialogues d'experts du Nanodialogue du gouvernement allemand⁷⁷.

Mise en réseau : UBA échange des informations sur le sujet au niveau national et européen avec les autorités et instituts partenaires, mais aussi avec les universités, les ONG et l'industrie. Cela se déroule, entre autres, au niveau national dans le cadre du groupe de travail interinstitutions des autorités fédérales supérieures, dans lequel différentes perspectives et expertises sur les matériaux avancés sont réunies et les défis et les besoins d'action vers les matériaux avancés sont identifiés par une autorité, perspective. Dans le cadre du groupe de travail de l'OCDE sur les nanomatériaux manufacturés (WPMN), l'UBA préside le groupe de pilotage sur les matériaux avancés, qui traite des questions de sécurité et de durabilité dans le contexte des matériaux avancés, et de leurs applications⁷⁸.

Prévision stratégique et systèmes d'alerte précoce : dans le cadre de la prévisualisation stratégique, UBA identifie de nouveaux sujets présentant un intérêt pour l'environnement. Dans ce contexte, UBA a évalué les impacts environnementaux de l'impression 3D dans une étude de tendance⁷⁹, qui constitue la base de recherches ultérieures sur le sujet à UBA. En collaboration avec des collègues du RIVM néerlandais, du BfR et du BAuA, les employés d'UBA ont développé le système d'alerte précoce EARLY4AdMa⁸⁰ pour l'identification des (nano)matériaux avancés qui devraient nécessiter une action en raison de problèmes de sécurité ou de durabilité.

Outils d'évaluation : En raison de son expertise dans l'évaluation des risques environnementaux réglementaires, UBA est impliquée dans divers comités et initiatives pour développer des outils d'évaluation des nanomatériaux pour la sécurité chimique. Par exemple, l'UBA est représentée au conseil d'administration de l'Initiative de Malte, qui vise à promouvoir le développement des méthodes d'essai de l'OCDE. Ces organismes et initiatives élargissent actuellement leur champ de travail aux (nano-)matériaux avancés. UBA reste engagée à apporter sa contribution ici.

Recherche : En plus de l'implication de UBA dans des projets financés par des tiers en tant que partenaire ou dans des organismes consultatifs au niveau national ou européen, UBA supervise un certain nombre de projets de recherche du ReFoPlan du BMUV. Ces recherches comprennent actuellement à la fois des recherches dites préparatoires, qui permettent d'identifier et de traiter de nouveaux thèmes et champs d'action pertinents, mais aussi des questions de recherche concrètes. Entre autres, UBA mène actuellement un projet qui traite des défis des nouveaux systèmes porteurs pour l'évaluation des risques environnementaux.

4 Résumé

Les matériaux avancés comprennent à la fois les matériaux nouveaux et existants qui ont des propriétés améliorées ou nouvelles par rapport aux matériaux conventionnels. Ainsi, ils comprennent un grand nombre de types de matériaux de structures et de complexités différentes, qui créent des propriétés et des fonctionnalités différentes, et pourraient donc être utilisés dans des domaines d'application très différents. Les produits chimiques et les matériaux sont essentiels pour la fourniture de techniques, de matériaux et de produits à faible émission de CO₂, non polluants, économes en énergie et en ressources. Ils sont indispensables à la transformation de la société et de l'économie vers une plus grande durabilité. Une discussion sur les défis posés par l'utilisation de matériaux avancés en termes de sécurité chimique et de durabilité est donc complexe et la question des actions appropriées pour relever les défis ne peut pas être résolue de manière uniforme pour tous les matériaux avancés. Cependant, sur la base de la composition chimique, des fonctionnalités et de la complexité d'un matériau avancé et de ses domaines d'application prévus, il est possible de formuler des questions qui peuvent nécessiter un examen plus approfondi. Cela concerne aussi bien les questions de risques environnementaux ou sanitaires que les empreintes écologiques jusqu'au cycle de vie.

UBA s'engage à identifier et à éviter les impacts négatifs sur la protection de l'environnement, la protection de la santé et la durabilité. Il développe des approches pour relever ces défis dans le but de contribuer à façonner la transformation urgente vers la durabilité en Allemagne, en Europe et dans le monde. Dans ce contexte, UBA souhaite identifier à un stade précoce les défis environnementaux des matériaux avancés et en déduire des mesures appropriées pour soutenir la meilleure utilisation possible des avantages de ces matériaux pour une transformation vers une économie et une société plus durables. Les matériaux avancés promettent des solutions techniques pour la transition énergétique et des transports, la préservation des ressources, la numérisation ou la santé, entre autres. Afin de soutenir le développement vers une économie et une société plus durables, il est indispensable que les matériaux avancés eux-mêmes soient sûrs et durables tout au long de leur cycle de vie. Pour garantir cela, UBA a identifié un certain nombre de points clés. Celles-ci incluent des approches pré-réglementaires telles que le transfert de connaissances, le dialogue, l'identification précoce et la recherche jusqu'au cycle de vie, ainsi que la fourniture d'outils d'évaluation appropriés. Ces approches devraient être reprises par les partis politiques et réglementaires ainsi que par la recherche.

Notes de fin

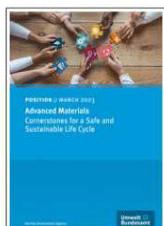
- 1 Commission mondiale sur l'environnement et le développement (CMED) (1987) Notre avenir à tous. <https://developpementdurable.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf>, consulté le 19 août 2022
- 2 J. Rockström, W. Steffen, K. Noone (2009) Un espace opérationnel sûr pour l'humanité. *Nature* 461, 472–475.
- 3 Nations Unies, Objectifs de développement durable. <https://sdgs.un.org/goals>, consulté le 19 août 2022
- 4 Accord vert européen de la Commission européenne, https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en, consulté le 19 août 2022
- 5 Advanced Material Initiative (2022) Materials 2030 Manifesto <https://www.ami2030.eu/>, consulté le 15 mars 2023
- 6 Commission européenne (2022) Chemicals Strategy for Durabilité. https://environment.ec.europa.eu/strategy/chemicals-strategy_en, consulté le 29 septembre 2022
- 7 BAuA, BfR, UBA (2022) Risk Governance of Advanced Matériaux. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/risk-governance-of-advanced-materials>, consulté le 19 août 2022
- 8 Commission européenne (2022) Commission Recommandation du 10 juin 2022 sur la définition du nanomatériau. [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32022H0614\(01\)](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32022H0614(01)), consulté le 29 septembre 2022
- 9 Définition de travail du groupe de travail interinstitutions allemand sur les matériaux avancés
- 10 OCDE (2022) Matériaux avancés : Description pratique. Série sur la sécurité des nanomatériaux manufacturés. n° 104. [https://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=ENV-CBC-MONO\(2022\)29&doclanguage=en](https://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=ENV-CBC-MONO(2022)29&doclanguage=en), consulté le 23 septembre 2022
- 11 B. Giese, M. Drapalik, L. Zajicek, D. Jepsen, A. Reihlen, T. Zimmermann (2020) Matériaux avancés : vue d'ensemble du domaine et critères de sélection pour l'évaluation de la pertinence. UBA TEXTE 132/2020. <https://www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/advanced-materials-overview-of-the-field-screening>, consulté le 18 août 2022. Ce rapport fait référence à une série de fiches d'information sur des matériaux avancés sélectionnés, disponibles sur https://oekopol.de/archiv/material/756_AdMa_Factsheets_final.pdf (consulté le 18 août 2022)
- 12 I. Andersen (2020) La triple crise planétaire : Forger une nouvelle relation entre les hommes et la terre, 14 juillet 2020, déclaration préparée pour remise au Sous-comité, Comité des représentants permanents. <https://www.unep.org/news-and-stories/speech/triple-planetary-crisis-forging-new-relationship-between-people-and-earth>, consulté le 18 septembre 2022
- 13 AV Herrera-Herrera, M.Á. González-Curbelo, J. Hernández Borges, M. Á. Rodríguez-Delgado (2012) Applications des nanotubes de carbone dans la science de la séparation : Une revue, *Analytica Chimica Acta*, 734, 1-30. JR Werber, CO Osuji, M. Elimelech (2016) Matériaux pour les membranes de dessalement et de purification de l'eau de nouvelle génération. *Nature Reviews Materials* 1(5):16018. A. Lee, JW Elam, SB Darling (2016) Matériaux membranaires pour la purification de l'eau : conception, développement et application, *Environmental Science : Water Research & Technology journal* 2, 17-42. M. Mon, R., J. Ferrando Bruno Soria, D. Armentano, E. Pardo (2018) Technologies de cadre métal-organique pour l'assainissement de l'eau : vers un écosystème durable. *Journal of Material Chemistry A* 6, 4912-4947. S. Rojas, A. Rodríguez-Diéguez, P. Horcajada (2022) Cadres métallo-organiques en agriculture. *ACS Applied Materials & Interfaces* 14(15):16983-7007. W. Zheng, J. Huang, S. Li, M. Ge, L. Teng, Z. Chen, et al. (2021) Matériaux avancés avec une mouillabilité spéciale pour l'assainissement intelligent des eaux usées huileuses. *ACS Applied Materials & Interfaces* 13(1):67-87.
- 14 V. García-Salcido, P. Mercado-Oliva, JL Guzmán-Mar, BI Kharisov, L. Hinojosa-Reyes. (2022) Composites à base de MOF pour la photocatalyse hétérogène pilotée par la lumière visible : synthèse, caractérisation et études d'application environnementale. *Journal of Solid State Chemistry* 207, 122801. C. Petite (2018) Présent et avenir de la recherche MOF dans le domaine de l'adsorption et de la séparation moléculaire. *Opinions actuelles en génie chimique* 20: 132-142. S. Rojas, A. Rodríguez Diéguez et P. Horcajada (2022) Metal-Organic Frameworks in Agriculture *ACS Appl. Mater. Interfaces* 14, 16983-17007.
- 15 ZA Althman, SM Wabaidur (2019) Application des nanotubes de carbone dans l'extraction et l'analyse chromatographique : Une revue, *Arabian Journal of Chemistry* 12, 633-651. C Diner, R. Bruch, E. Costa-Rama, MT Fernández-Abedul, A. Merkoçi, A. Manz, et al. (2019) Capteurs jetables dans les diagnostics, l'alimentation et la surveillance de l'environnement. *Matériaux avancés* 31(30):1806739. G. Fadillah, OA Saputra, TA Saleh (2020) Tendances des polymères nanostructures fonctionnalisées pour l'analyse des polluants environnementaux. *Tendances en chimie analytique environnementale* 26:e00084. K. Nemčková, J. Labuda (2021) Capteurs électrochimiques intégrés par matériaux avancés comme outils de diagnostic médical prometteurs : une revue. *Science et ingénierie des matériaux C-Materials for Biological Applications* 120:111751. R. Keçili, F. Ghorbani-Bidkorbeh, ©. Dolak, G. Canpolat, M. Karabörk, CM Hussain (2021) Nanoparticules magnétiques fonctionnalisées en tant que puissants sorbants et phases stationnaires pour l'extraction et les applications chromatographiques, *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 143, 116380.
- 16 H. Wang, Y. Zhang, X. Liang, Y. Zhang (2021) Fibres et textiles intelligents pour la gestion personnelle de la santé. *ACS Nano* 15(8):12497-508.
- 17 N. Osterwalder (2006) Consommation d'énergie pendant production de nanoparticules : quelle est la rentabilité de la synthèse sèche ? *Journal de recherche sur les nanoparticules* 8 : 1-9.
- 18 PL Chariou, OA Ortega-Rivera, NF Steinmetz (2020) Nanotransporteurs pour la livraison d'ingrédients actifs médicaux, vétérinaires et agricoles. *ACS Nano* 14(3):2678-701.

- 19 B. Halamoda-Kenzaoui, H. Box, M. Van Elk, S. Gaitan, R. Geertsma, E. Gainza Lafuente, et al. (2019) Anticipation des besoins réglementaires pour les produits de santé basés sur les nanotechnologies - Le livre blanc REFINE. Office des publications de l'Union européenne. doi:10.2760/599552.
- 20 S. Berkner, K. Schwirn, D. Voelker (2022) Trop avancé pour une évaluation ? Matériaux avancés, nanomédecine et environnement. *Sciences de l'environnement Europe* 34(1):71.
- 21 L. Tang, X. Meng, D. Deng, X. Bao (2019) Confinement Catalyse avec des matériaux 2D pour la conversion d'énergie. *Matériaux avancés* 31(50):1901996. H. Fang, J. Yang, M. Wen, Q. Wu (2018) Matériaux nanoalliages pour la catalyse chimique. *Adv Mater* 30(17):e1705698. Y. Zhu, L. Peng, Z. Fang, C. Yan, X. Zhang, G. Yu (2018) Ingénierie structurale des nanomatériaux 2D pour le stockage d'énergie et la catalyse. *Matériaux avancés* 30(15):1706347.
- 22 HM Ibrahim, A. Klingner A (2020) Une revue sur les nanofibres polymères électrofilées : Paramètres de production et applications potentielles. *Polymer Testing* 90:106647. VS Reddy, Y. Tian, C. Zhang, Z. Ye, K. Roy, A. Chinnappan, et al. (2021) Un examen des applications avancées basées sur les nanofibres électrofilées : des soins de santé aux dispositifs énergétiques. *Polymères* 13(21): 3746.
- 23 AH Espera, JRC Dizon, Q. Chen, RC Advincula (2019) Impression 3D et fabrication avancée pour l'électronique. *Progrès dans la fabrication additive* 4:245-267 ; Y.Khan, A. Thielens, S. Muin, J. Ting, C. Baumbauer, AC Arias (2019) Une nouvelle frontière de l'électronique imprimée : l'électronique hybride flexible. *Matériaux avancés* 32, 1905279. Q. Huang, Y. Zhu (2019) Impression de nanomatériaux conducteurs pour l'électronique flexible et extensible : examen des matériaux, des processus et des applications. *Technologies des matériaux avancés* 4, 1800546.
- 24 I. Karapanagiotis, PN Manoudis (2022) Matériaux superhydrophobes et superamphiphobes pour la conservation de la pierre naturelle : Un aperçu. *Construction et matériaux de construction* 320:126175. H. Yan, Q. Wu, C. Yu, T. Zhao, M. Lui (2020) Progrès récents des surfaces antisalissures biomimétiques en milieu marin. *Advanced Materials Interfaces* 7, 2000966. Y. Huang, L. Deng, P. Ju, L. Hung, H. Qian, D. Zhang, et al. (2018) Revêtements protecteurs auto-cicatrisants à triple action basés sur des polymères à mémoire de forme contenant des microsphères à double fonction. *ACS Applied Materials and Interfaces* 10, 23369-23379. G. Cui, C. Zhang, A. Wang, X. Zhou (2021) Progrès de la recherche sur les revêtements anticorrosion polymère/graphène auto-cicatrisants. *Progress in Organic Coatings* 155, 106231. L. Zhai, A. Narkar, K. Ahn (2020) Polymères auto-cicatrisants avec nanomatériaux et nanostructures. *Nano Today* 30, 100826. CI Idumah & SR Odera (2020) Progrès récents dans les nanocomposites polymères de graphène auto-cicatrisants, la mémoire de forme et les matériaux de revêtement. *Technologie et matériaux polymères-plastiques* 59, 1167-1190. IS Bayer (2020) Revêtements superhydrophobes à partir de matériaux et procédés respectueux de l'environnement : un examen. *Interfaces de matériaux avancés* 7, 2000095.
- 25 B. Keppner, W. Kahlenborn, S Richter, T. Jetzke T, A. Lessmann, M Bovenschulte (2018) Focus sur l'avenir : impression 3D - Rapport de tendance pour l'évaluation des impacts environnementaux. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/focus-on-the-future-3d-printing>, consulté le 18 août 2022
- 26 TD Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, KTQ Nguyen, D. Hui D (2018) Fabrication additive (impression 3D) : examen des matériaux, des méthodes, des applications et des défis. *Composites Partie B : Ingénierie* 143:172-96. A. Haleem, M. Javaid (2019) Applications de fabrication additive dans l'industrie 4.0 : un examen. *Journal d'intégration et de gestion industrielles* 4, 1930001.M. Askari, DA Hutchins, PJ Thomas, L. Astolfi, RL Watson, M. Abdi et al. (2020) Fabrication additive de métamatériaux : un bilan, *Fabrication additive* 36:101562. Deutscher Bundestag Drucksache 20/3110 Bericht des Ausschusses für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung (18. Ausschuss) gemäß § 56a der Geschäftsordnung. *Technikfolgenabschätzung (TA) Innovative Technologien, Prozess und Produkte in der Bauwirtschaft* <https://dserver.bundestag.de/btd/20/031/2003110.pdf>, consulté le 27 septembre 2022 ; SK Karunakaran, directeur général
- Arumugam, W. Yang, S. Ge, SN Khan, X. Lin, et al. (2019) Progrès récents dans les cellules solaires imprimées par injection. *Journal de chimie des matériaux A* 7, 13873.
- 27 KR Ryan, MP Down, CE Banks (2021) L'avenir de la fabrication additive : aperçu des matériaux intelligents et avancés imprimés en 4D et en 3D et de leurs applications. *Chemical Engineering Journal* 403:126162.
- 28 C. Gao, S. Wolff, S. Wang S (2021) Additif écologique fabrication de métaux : Efficacité énergétique et analyse du cycle de vie. *Journal des systèmes de fabrication* 60:459-72.
- 29 T. Peng, K. Kellens, R. Tang, C. Chen, G. Chen (2018) Durabilité de la fabrication additive : un aperçu de sa demande énergétique et de son impact environnemental. *Fabrication additive* 21 : 694-704. ; M. Mani, KW Lyons, Sask. Gupta (2014) Caractérisation de la durabilité pour la fabrication additive. *Journal de recherche de l'Institut national des normes et de la technologie* 119:419-28. S. Ford, M. Despeisse (2016) Fabrication additive et durabilité : une étude exploratoire des avantages et des enjeux. *Journal of Cleaner Production* 137:1573-87.
- 30 H. Sigloch, F. Bierkandt, AV Singh, AK Gadicherla, P. Laux, A. Luch (2020) Évaluation des émissions de particules d'un stylo d'impression 3D. *J.Vis. Exp.* (164), e61829. JI Arrizubieta, O. Ukar, M. Ostolaza, A. mugica (2020) Étude des implications environnementales de l'utilisation de la poudre métallique dans la fabrication additive et sa manipulation. *Métaux* 10, 261.
- 31 S. Seeger, D. Brödner, T. Jacobi, F. Rasch, M. Rothardt, O. Wilke (2018) L'émission de particules fines et ultrafines et de composés organiques volatils forment différents matériaux de filament exploités sur une imprimante 3D à faible coût Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft 78, 79-86. J. Yi, R. Lebof, M. Duling, T. Nurkiewicz, B. Chen, D. Schwegler-Berry, et al. (2016) Émission de particules provenant d'une imprimante tridimensionnelle (3D) de bureau. *Journal de toxicologie et de santé environnementale, partie A* 79:1-13. E. Alberts, M. Ballentine, E. Barnes, A. Kennedy (2021) Impact des additifs métalliques sur les profils d'émission de particules d'une imprimante 3D de fabrication de filaments fondus. *Environnement atmosphérique* 244:117956. R. Chýlek, L. Kudela, J. Pospíšil, L. Šnajdárek (2021) Paramètres influençant l'émission de particules ultrafines lors de l'impression 3D. *Journal international de recherche environnementale et de santé publique* 18(21):11670.

- 32 AH Tkaczyk, A. Bartl, A. Amato, V. Lapkovskis, M. Petranikova (2018) Évaluation de la durabilité des matières premières critiques essentielles : cobalt, niobium, tungstène et terres rares. *Journal of Physics D: Applied Physics* 51, 203001. E. Hache, GS Seck, M. Simoen, C. Bonnet, S. Carcanague. (2019) Matières premières critiques et électrification du secteur des transports : une analyse ascendante détaillée des transports mondiaux. *Énergie appliquée* 240, 6-25
- 33 P. Quicker, J. Stockschläder, D. Stapf, W. Baumann, M. Wexler, M. Beckmann, C. Thiel, U. Teipel, E. Seiler, H. Hoppe, V. Hoenig (2021) Möglichkeiten und Grenzen der Entsorgung carbonfaserverstärkter Kunststoffabfälle in thermischen Prozessen, UBA-Text 131/2021. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/moeglichkeiten-grenzen-der-entsorgung>, consulté le 19 août 2022
- 34 IM Alarifi (2021) Matériaux de sélection avancés dans l'efficacité des cellules solaires et leurs propriétés - Une revue complète. *Matériaux aujourd'hui* : Actes. S.Das, D. Pandey, J. Thomas, T. Roy (2019) Le rôle du graphène et d'autres matériaux 2D dans le photovoltaïque solaire. *Matériaux avancés* 31(1):1802722.
- 35 Département américain de l'énergie (2016) Journée mondiale du vent 2016 – Rôle de l'AMO dans l'application de l'impression 3D à la fabrication de moules pour pales de vent , <https://www.energy.gov/eere/amo/articles/global-wind-day-2016-amo-s-role-applying-3d-printing-wind-blade-mold-manufacturing>, consulté le 19 août 2022. Science Daily (2016) Lightweight rotor blades made from plastic foams for offshore wind turbines, <https://www.sciencedaily.com/releases/2016/10/161021084515.htm>, publié le 19.08.2022. C. Tong (2019) Les matériaux avancés permettent la capture et la production d'énergie éolienne renouvelable. Dans : C. Tong (ed) *Introduction aux matériaux pour les systèmes énergétiques avancés*. Springer International Publishing, Cham.
- 36 Par exemple Fraunhofer IFAM, <https://www.ifam.fraunhofer.de/en/Aboutus/Locations/Dresden/HydrogenTechnology.html> , consulté le 19 août 2022
- 37 Commission européenne, Partnership on Advanced Materials for Batteries for Electro-mobility and Stationary Energy Storage, <https://s3platform.jrc.ec.europa.eu/advanced-materials-for-batteries>, consulté le 19 août 2022. IPEI Batteries Project, <https://www.ipei-batteries.eu/>, consulté le 19 août 2022, Y. Zhang, R. Knibbe, J. Sunarso, Y. Zhong, W. Zhou, Z. Shao, et al. (2017) Progrès récents sur les matériaux avancés pour les piles à combustible à oxyde solide fonctionnant en dessous de 500 °C. *Matériaux avancés* 29(48):1700132. J. Lopez, DG Mackanic, Y. Cui, Z. Bao (2019) Conception de polymères pour la chimie avancée des batteries. *Nature Reviews Materials* 4(5):312-30. CM Costa, E. Lizundia, S. Lanceros-Méndez (2020) Polymères pour les batteries lithium-ion avancées : état de l'art et besoins futurs en polymères pour les différents composants de la batterie. *Progress in Energy and Combustion Science* 79:100846. C. Yang, H. Wei, L. Guan, J. Guo, Y. Wang, X. Yan, et al. (2015) Nanocomposites polymères pour le stockage d'énergie, les économies d'énergie et l'anticorrosion. *Journal de chimie des matériaux A* 3(29), 14929-41. J. Mei, T. Liao, L. Kou, Z. Sun Z (2017) Nanomatériaux à oxyde métallique bidimensionnel pour batteries rechargeables de nouvelle génération. *Matériaux avancés* 29(48):1700176. E. Barrios D. Fox, YYL Sip, R. Catarata, JE Calderon, N. Azim, et al. (2019) Nanomatériaux dans les composites d'aérogel avancés à hautes performances : un examen. *Polymères* 11, 726.
- 38 Y. Yan, WI Shin, H. Chen, SM Lee, S. Manickam, S. Hanson, et al. (2021) Une tendance récente : l'application du graphène en catalyse. *Lettre au carbone* 31:1777-199 ; YH Li, JY Li, YJ Xu (2021) Nanoparticules bimétalliques comme cocatalyseurs pour la catalyse photoredox polyvalente. *EnergyChem* 3, 1000047.
- 39 G. Chen, Y. Li, M. Bick, J. Chen (2020) Textiles intelligents pour Production d'électricité. *Revue chimique* 120, 3668-3720.
- 40 C. Li, Z. Chen, W. Dong, L. Lin, X. Zhu, Q. Liu, et al. (2021) Un bilan des matériaux d'isolation thermique en aérogel à base de silicium : optimisation des performances par la composition et la microstructure. *Journal of Non Crystalline Solids* 553:120517.
- 41 Z. Qui, Z. Xiao, L. Gao, J. Li, H. Wang, Y. Wang, et al. (2019) Bois transparent ayant un effet de protection contre la chaleur infrarouge et ultraviolette via l'incorporation de nanoparticules d'oxyde d'étain modifié dopé à l'antimoine. *Science et technologie des composites* 172, 43-48, HN Kim, S. Yang (2020) Fenêtres intelligentes réactives à partir de composites nanoparticules-polymères. *Rapport d'étape. Matériaux fonctionnels avancés* 30, 1902597.
- 42 L. Kong, C. Tang, HJ Peng, JQ Huang, Q. Zhang (2020) Matériaux énergétiques avancés pour batteries flexibles dans le stockage de l'énergie : un bilan. *SmartMat* 1:e1007. C. Li, R. Liu, Y. Xiao, F. Cao, H. Zhang (2021) Progrès récents des séparateurs dans les batteries lithium-soufre. *Energy Storage Materials* 40:439- 60. L. Zhang, X. Li, M. Yang, W. Chen W (2021) Séparateurs haute sécurité pour batteries lithium-ion et batteries sodium-ion : avancées et perspectives. *Matériaux de stockage d'énergie* 41, 522-45. H. Liu, H. Du, T. Zheng, K. Liu, X. Ji, T. Xu, et al. (2021) Mousses et aérogels composites à base de cellulose pour dispositifs avancés de stockage d'énergie. *Chemical Engineering Journal* 426:130817. F. Zou, A. Manthiram (2020) Examen de la conception de liants avancés pour batteries hautes performances. *Matériaux énergétiques avancés* 10(45):2002508.; J. Kalhoff, GG Eshetu, D. Bresser, S. Passerini (2015) Électrolytes plus sûrs pour les batteries lithium-ion : état de l'art et perspectives. *ChemSusChem* 8(13):2154-75.
- 43 X. Shu, Y. Guo, W. Yang, K. Wei, G. Zhu (2021) Vie évaluation du cycle de l'impact environnemental des batteries utilisées dans les voitures particulières électriques pures. *Rapports énergétiques* 7,2302-15. H. Stahl, D. Bauknecht, A. Hermann, W. Jenseit, AR Köhler, C. Merz, et al. (2016) Ableitung von Recycling- und Umweltaforderungen und Strategien zur Vermeidung von Versorgungsrisiken bei innovativen Energiespeichern. UBA TEXTE 07/2016. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/ableitung-von-cycling-umweltaforderungen>, consulté le 18 août 2022
- 44 AIE (2022) Le rôle des minéraux critiques dans l'énergie propre Transitions - Spécial Perspectives énergétiques mondiales, <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>, consulté le 19 août 2022
- 45 S. Bobba, F. Mathieux, GA Blengini (2019) Comment la seconde utilisation des batteries affectera-t-elle les stocks et les flux dans l'UE ? Un modèle pour les batteries Li-ion de traction. *Ressources, conservation et recyclage* 145:279-91. Y. Tao, CD Rahn, LA Archer, F. You (2021) Seconde vie et recyclage : perspectives de durabilité énergétique et environnementale pour les batteries lithium-ion hautes performances. *Science Advances* 7(45):eabi7633.
- 46 DH Kang, M. Chen, OA Ogunseitan (2013) Potentiel impacts sur l'environnement et la santé humaine des piles au lithium rechargeables dans les déchets électroniques. *Technologie Environ Sci* 47,5495-503.

- 47 D. Bresser, D. Buchholz, A. Moretti, A. Varzi, S. Passerini (2018) Liants alternatifs pour le stockage d'énergie électrochimique durable - la transition vers le traitement des électrodes aqueuses et les polymères biodérivés. *Sciences de l'énergie et de l'environnement* 11(11),3096-127.
- 48 W. Weber, R. Wagner, B. Streipert, V. Kraft, M. Winter, S. Nowak (2016) Enquêtes sur la spectrométrie de masse par chromatographie ionique et gazeuse des organophosphates dans les électrolytes des batteries lithium-ion par vieillissement électrochimique à des potentiels cathodiques élevés. *Journal des sources d'alimentation* 306,193-9.; L. Terborg, S. Weber, F. Blaske, S. Passerini, M. Winter, U. Karst, et al. (2013) Enquête sur les mécanismes de vieillissement thermique et d'hydrolyse dans l'électrolyte des batteries lithium-ion commerciales. *Journal des sources d'alimentation* 242:832-7. V. Kraft, M. Grütze, W. Weber, J. Menzel, S. Wiemers-Meyer, M. Hiver, et al. (2015) Chromatographie ionique bidimensionnelle pour la séparation des organophosphates ioniques générés dans des électrolytes de batterie lithium-ion à base d'hexafluorophosphate de lithium décomposés thermiquement. *Journal de chromatographie A* 1409,201-9. M. Grütze, V. Kraft, B. Hoffmann, S. Klamor, J. Diekmann, A. Kwade (2015) Enquêtes sur le vieillissement d'un électrolyte de batterie lithium-ion d'un véhicule électrique hybride testé sur le terrain. *Journal des sources d'alimentation* 273, 83-8.
- 49 BAuA, BfR, UBA (2022) Risk Governance of Advanced Materials. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/risk-governance-of-advanced-materials> , consulté le 19 août 2022
- 50 A. Reihlen, D. Jepsen, T. Zimmermann, B. Giese, M. Drapalik, L. Zajicek (2022) Conférences thématiques Matériaux avancés – Évaluations de la nécessité d'agir sur la sécurité chimique. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/thematic-conferences-advanced-materials> , consulté le 19 août 2022
- 51 C. Caldeira, R. Farcal, I. Garmendia Aguirre, L. Mancini, D. Tosches, A. Amelio, et al. (2022) Produits chimiques et matériaux sûrs et durables dès la conception - Cadre pour la définition des critères et de la procédure d'évaluation pour les produits chimiques et les matériaux, EUR 31100 EN, Office des publications de l'Union européenne. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC128591> _
- 52 Groupe d'experts sur « une substance, une évaluation », <https://ec.europa.eu/transparency/expert-groups-register/screen/expert-groups/consult?lang=en&groupID=3792> , consulté le 16 novembre 2022
- 53 Commission européenne, Table ronde de haut niveau sur la mise en œuvre de la stratégie relative aux produits chimiques pour la durabilité (2022) Document d'information 1 – État de la mise en œuvre de la stratégie relative aux produits chimiques pour la durabilité, 18 mai 2022, <https://ec.europa.eu/transparency/expert-groups-register/core/api/front/document/83178/download> , consulté le 06 décembre 2022
- 54 Proposition de règlement du Parlement européen et du Conseil établissant un cadre pour la fixation d'exigences d'écoconception applicables aux produits durables et abrogeant la directive 2009/125/CE du 30.3.2022 COM(2022) 142 final, 2022/0095 (COD); EUR-Lex - 52022PC0142 - FR - EUR-Lex (europa.eu), consulté le 18 août 2022
- 55 E. Barteková, P. Börkey (2022) Digitalisation for the transition to a resource efficient and circular economy, Environment Working Paper No. 192, <https://www.oecd.org/publications/digitalisation-for-the-transition-to-a-resource-efficient-and-circular-economy-6f6d18e7-en.htm> , consulté le 18 août 2022
- 56 PNUE (2019) : Global Chemicals Outlook II – From Legacies aux solutions innovantes : mise en œuvre de l'Agenda 2030 pour le développement durable. <https://www.unep.org/explore-topic/chemicals-waste/what-we-do/policy-and-governance/global-chemicals-outlook> , consulté le 18 septembre 2022.
- 57 ONU, Transformer notre monde : le Programme de développement durable à l'horizon 2030. <https://sdgs.un.org/2030agenda> , consulté le 29 septembre 2022
- 58 SAICM (2019) Évaluation indépendante de la Stratégie Approche de la gestion internationale des produits chimiques de 2006 à 2015, Documents SAICM/IP.3/9 (résumé exécutif, 13 pages) et SAICM/IP.3/INF/3 (rapport final, 94 pages), <http://saicm.org/Beyond2020/IntersessionalProcess/ThirdIntersessionalmeeting/tabid/8024/language/en-US/Default.aspx> , consulté le 29 septembre 2022
- 59 PNUE (2019) : Global Chemicals Outlook II – From Legacies to Innovative Solutions : Implementing the 2030 Agenda for Sustainable Development, <https://www.unep.org/explore-topic/chemicals-waste/what-we-do/policy-and-governance/global-chemicals-outlook> , consulté le 18 septembre 2022
- 60 Pour référence et plus d'informations, voir <https://www.acs.org/content/acs/en/greenchemistry/principles/12-principles-of-green-chemistry.html> , consulté le 29 septembre 2022
- 61 UBA (2009) Chimie durable. Positions et critères de l'Agence fédérale de l'environnement, disponible sur <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/sustainable-chemistry> , consulté le 29 septembre 2022
- 62 PNUE (2020) Chimie verte et durable : Manuel-cadre. 106 pages. Accompagné de l'infographie "Advancing the 10 Objectives and Guiding Considerations For Green and Sustainable Chemistry", disponible sur <https://www.unep.org/explore-topics/chemicals-waste/what-we-do/policy-and-governance/chimie-verte-et-durable> , consulté le 29 septembre 2022
- 63 Centre de collaboration international pour une chimie durable. www.isc3.org , consulté le 29 septembre 2022
- 64 ISC3 (2021) Caractéristiques clés de la chimie durable. <https://www.isc3.org/page/sustainable-chemistry/who-we-are/key-characteristics-of-sustainable-chemistry> , consulté le 29 septembre 2022
- 65 OCDE. Évaluation des alternatives et substitution des produits chimiques nocifs. <https://www.oecd.org/chemicalsafety/risk-management/substitution-of-hazardous-chemicals/> , consulté le 29 septembre 2022
- 66 UBA (2016) Guide sur les produits chimiques durables. Un outil de décision pour les fabricants de substances, les formulateurs et les utilisateurs finaux de produits chimiques. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/guide-on-sustainable-chemicals> , consulté le 29 septembre 2022
- 67 UBA (2020) SubSelect - Guide pour la sélection de produits chimiques durables. <https://www.umweltbundesamt.de/en/document/subselect-guide-for-the-selection-of-sustainable> , consulté le 29 septembre 2022

- 68 OCDE (2022) Matériaux avancés : Description pratique. Série sur la sécurité des nanomatériaux manufacturés, n° 105. [https://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=ENV-CBC-MONO\(2022\)30&doclanguage=en](https://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=ENV-CBC-MONO(2022)30&doclanguage=en), consulté le 16 novembre 2022
- 69 UBA, communiqué de presse du 30 novembre 2021, <https://www.umweltbundesamt.de/en/press/pressinformation/chemicals-better-protection-of-environment-health>, consulté le 29 septembre 2022
- 70 NanoSafetyCluster (2022) Groupe de travail A, <https://www.nanosafetycluster.eu/nsc-overview/nsc-structure/working-groups/wga/>, consulté le 29 septembre 2022
- 71 EU H2020 Project Développement et standardisation de méthodes pour les essais de sécurité des nanomatériaux manufacturés à l'OCDE (NANOMET), <https://www.oecd.org/chemicalsafety/nanomet/>, consulté le 29 septembre 2022
- 72 Partenariat européen pour l'évaluation des risques liés aux produits chimiques, <https://www.eu-parc.eu/>, consulté le 22 février 2023
- 73 FAIR = trouvable, accessible, interopérable, réutilisable
- 74 A. Oomen, L. Soeteman-Hernandez, W. Peijnenburg, E. Bleeker, E. Swart, C. Noorlander, et al. (2022) Vers des (nano)matériaux avancés sûrs et durables : une proposition pour un système de sensibilisation et d'action précoce pour les matériaux avancés (Early4AdMa), <https://www.rivm.nl/documenten/Early4AdMa-brochure>, consultée le 29 septembre 2022
- 75 Le système de prospective de l'UE pour l'identification des problèmes environnementaux émergents et des opportunités et risques associés (FORENV) https://ec.europa.eu/environment/integration/research/forenv_en.htm (en particulier, le rapport sur : Emerging societal, questions économiques et environnementales susceptibles d'avoir un impact sur notre capacité à atteindre une ambition zéro pollution pour un environnement sans produits toxiques d'ici 2050), consulté le 29 septembre 2022
- 76 D. Destoumieux-Garzón, P. Mavingui, G. Boetsch, J. Boissier, F. Darriet, P. Duboz, et al. (2018) Le concept One Health : 10 ans et un long chemin à parcourir. *Front Vet Sci*, 5:14.
- 77 BMUV, NanoDialogue, <https://www.bmuv.de/en/topics/health-chemicals/nanotechnology/the-nanodialogue>, consulté le 8 septembre 2022
- 78 Groupe de travail de l'OCDE sur les nanomatériaux manufacturés, <https://www.oecd.org/science/nanosafety/>, consulté le 8 septembre 2022
- 79 B. Keppner, W. Kahlenborn, S. Richter, T. Jetzke, A. Lessmann, M. Bovenschulte (2018) Focus sur l'avenir : Impression 3D – Rapport de tendance pour l'évaluation des impacts environnementaux, <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/focus-on-the-future-3d-printing>, consulté le 08 septembre 2022
- 80 A. Oomen, L. Soeteman-Hernandez, W. Peijnenburg, E. Bleeker, E. Swart, C. Noorlander, et al. (2022) Vers des (nano)matériaux avancés sûrs et durables : une proposition pour un système de sensibilisation et d'action précoce pour les matériaux avancés (Early4AdMa), DOI:10.21945/brochure-advanced-materials <https://www.rivm.nl/documenten/Brochure-Advanced-Materials>, consultée le 29 septembre 2022



Cette brochure en
téléchargement [Lien court : bit.ly/2dowYYI](https://bit.ly/2dowYYI)

 www.facebook.com/umweltbundesamt.de

 www.twitter.com/umweltbundesamt

 www.youtube.com/user/umweltbundesamt

 www.instagram.com/umweltbundesamt/