

5 Innovation dans le domaine des plastiques

Il est possible d'innover dans la production, la transformation et le recyclage des plastiques. Ce chapitre examine d'abord les tendances générales de l'innovation en matière de technologies qui ont une utilité pour l'environnement dans le domaine des plastiques, avant d'étudier le lien empirique entre les politiques d'économie circulaire et l'innovation. Pour finir, ce chapitre met l'accent sur les tendances récentes portant sur des technologies spécifiques et leurs implications en termes de politiques publiques.

MESSAGES CLÉS

- L'innovation à toutes les étapes de la chaîne de valeur des plastiques sera primordiale pour réduire les répercussions de ces matières sur l'environnement. Ce chapitre présente une approche nouvelle élaborée pour conceptualiser cette innovation et la quantifier à l'échelle mondiale, en s'appuyant sur les données relatives aux brevets et aux marques déposées des trente dernières années.
- L'innovation concernant des technologies en rapport avec l'environnement dans le domaine des plastiques a progressé à un rythme soutenu : le nombre de brevets correspondants a été multiplié par 3.4 entre 1990 et 2017. En outre, notre analyse des données relatives aux marques déposées, qui mesurent des innovations technologiquement peu avancées qui ne transparaissent pas forcément dans les données sur les brevets, indique qu'entre 1995 et 2017, les innovations en matière de réemploi des plastiques ont augmenté de 23 % par an, tandis que celles concernant la réparation des plastiques ont progressé de 12 % par an.
- La moitié environ des innovations brevetées pertinentes pour l'environnement en 2017 était axée sur la circularité, c'est-à-dire sur la prévention et le recyclage des déchets plastiques. Un tiers portait sur les matières premières biosourcées, et la part restante concernait la conversion thermique ou l'élimination des déchets, ainsi que l'extraction des plastiques rejetés dans l'environnement.
- Parmi les brevets déposés, ceux portant sur le recyclage sont devenus plus nombreux que ceux portant sur la prévention des déchets, ce qui est peut-être expliqué par une attention plus importante accordée au recyclage par les pouvoirs publics et les consommateurs.
- Notre analyse quantitative indique que les politiques promouvant l'économie circulaire, telles que les filières à responsabilité élargie des producteurs, peuvent encourager l'innovation dans le domaine du recyclage des déchets plastiques. Les innovations portant sur la prévention et le recyclage des déchets plastiques restent toutefois peu nombreuses : elles représentaient 1.2 % seulement des innovations totales dans le domaine des plastiques en 2017, une proportion comparable à celle mesurée pour l'année 1990 (1.1 %). Des politiques nettement plus ambitieuses sont nécessaires pour orienter les avancées technologiques vers le bouclage de la boucle des plastiques et la réduction des rejets dans l'environnement.
- L'innovation est concentrée dans les pays de l'OCDE et en République populaire de Chine, qui sont à l'origine de plus de 80 % des brevets en rapport avec la circularité des plastiques. Étant donné les rejets de plastiques de plus en plus importants observés dans les pays en développement, il est nécessaire d'accélérer le transfert international de ces technologies.
- L'innovation pertinente pour l'environnement dans le domaine des plastiques évolue rapidement. Par exemple, celles concernant les plastiques biodégradables ont progressé rapidement au cours des dix dernières années avant de ralentir récemment, probablement en raison d'interrogations sur le degré de biodégradabilité réelle de ces matériaux dans les milieux naturels. Dans le domaine du recyclage chimique, qui cible notamment les déchets ne se prêtant pas à un recyclage mécanique, les technologies n'en sont qu'à leurs débuts mais doivent surmonter des difficultés non négligeables. De nombreuses autres innovations sur tout le cycle de vie des plastiques sont également en train d'émerger.
- L'innovation ne débouchera sur des solutions largement applicables que si la demande de plastiques circulaires est forte. Par conséquent, les investissements dans l'innovation devraient aller de pair avec des mesures en faveur de l'éducation et d'une plus importante sensibilisation à l'environnement des incitations financières pour faire évoluer les comportements et des réglementations contraignantes qui doivent être conçues et appliquées en fonction du contexte local.

5.1. Quelles sont les tendances relatives aux innovations pertinentes pour l'environnement dans le domaine des plastiques ?

Pour répondre à cette question, la présente analyse quantifie l'innovation pertinente pour l'environnement dans le domaine des plastiques en s'appuyant sur les données relatives aux brevets et aux marques déposées. Un brevet est un droit exclusif octroyé à un inventeur qui lui permet d'utiliser et de vendre son invention pendant un nombre d'années donné. Compter les brevets est une méthode standard utilisée pour mesurer l'innovation car cela permet de disposer d'informations précises sur les innovations récentes présentant une valeur marchande significative (Narin, 1995^[1]). En revanche, les données relatives aux marques déposées mesurent les innovations technologiquement peu avancées qui ne transparaissent pas nécessairement dans les données sur les brevets.

Ainsi, dénombrer les brevets peut permettre de mesurer l'innovation pertinente pour l'environnement dans le domaine des plastiques. Pour ce faire, les informations textuelles contenues dans les résumés de brevets ont fait l'objet de recherches dans la base de données PATSTAT avec diverses combinaisons de mots-clés. Par exemple, les inventions concernant le recyclage mécanique peuvent être identifiées en recherchant les phrases « déchets plastiques broyés » ou « valorisation des débris de polymères », tandis que les brevets portant sur le recyclage chimique de plastique à plastique peuvent être retrouvés en cherchant des termes tels que « hydrolyse » ou « glycolyse ».

Après l'exploration de la base de données, les inventions retenues ont été examinées en vue de l'extraction des familles de brevets portant sur des innovations pertinentes pour l'environnement dans le domaine des plastiques et ont été classées en trois groupes principaux (Graphique 5.1) :

1. Les innovations pour la prévention et le recyclage des plastiques : la « prévention des plastiques » est un terme large qui englobe non seulement les innovations pour la prévention des déchets plastiques, mais aussi les innovations en matière de technologies ou de processus qui utilisent d'emblée moins de plastiques. Ces innovations pour la prévention et le recyclage sont également appelées « innovations pour la circularité des plastiques ».
2. Les innovations pour la conversion (en énergie ou combustible) ou l'élimination des déchets et la réduction et l'extraction des plastiques rejetés dans l'environnement.
3. Les innovations dans le domaine des matières premières biosourcées.

A l'aide d'une comparaison entre pays, seules les familles de brevets ayant été délivrés par plusieurs offices nationaux des brevets ont été comptabilisées pour éviter l'accumulation d'un trop grand nombre de brevets de moindre valeur¹. L'analyse inclut les données relatives aux brevets de 1990 à 2017, car les données des années plus récentes pourraient être incomplètes en raison du délai d'enregistrement des brevets. Plus encore, si l'on s'intéresse aux familles de brevets internationales ou régionales, les années disponibles reculent de 2017 à 2014 en raison du délai entre le premier dépôt de brevet dans un pays donné et les dépôts ultérieurs dans d'autres pays.

Graphique 5.1. Classification des innovations intéressantes pour l'environnement dans le domaine des plastiques



Source : Dussaux et Agrawala (2022^[2]).

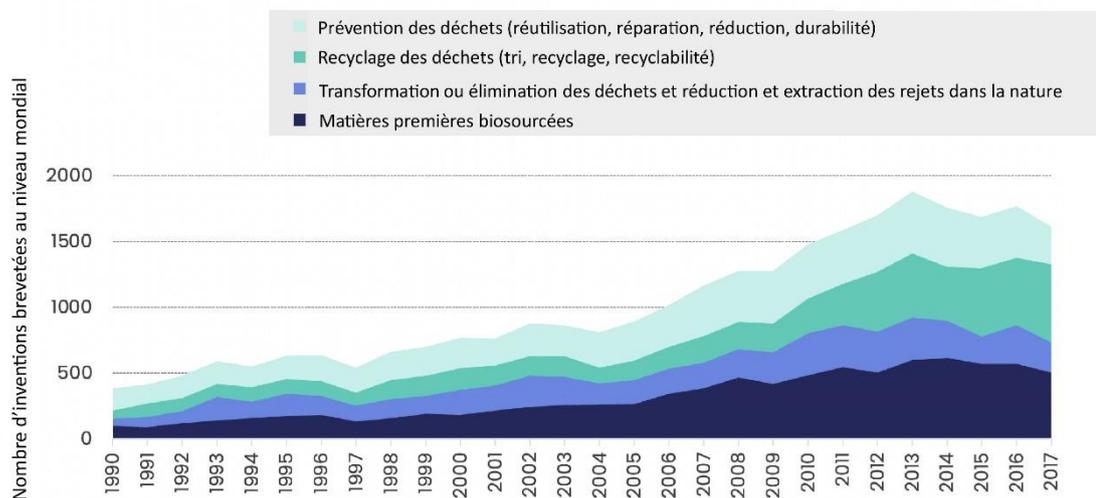
Pour certaines technologies, les données relatives aux brevets ne sont pas toujours les plus pertinentes pour mesurer l'innovation.² C'est le cas du réemploi des plastiques qui relève d'innovations de faible niveau technologique et souvent non brevetées, ou encore celui des innovations en rapport avec la réparation des plastiques qui sont déjà largement commercialisées. Le nombre de marques déposées constitue alors un indicateur mieux à même de mesurer les tendances de l'innovation dans ces technologies. Par exemple, les marques déposées sont utilisées pour protéger l'innovation dans des récipients ou gobelets en plastique réutilisables, des gourdes et des emballages plastiques utilisés par les services de livraison. Les produits réutilisables peuvent sembler technologiquement peu avancés, mais la logistique derrière les systèmes de transport et conteneurs partagés constitue une réelle innovation.

5.1.1. L'innovation pertinente pour l'environnement dans le domaine des plastiques se développe mais reste relativement petite

L'innovation concernant des technologies pertinentes pour l'environnement dans le domaine des plastiques a progressé à un rythme soutenu ces 30 dernières années (Graphique 5.2). Le nombre de brevets dans ce secteur a été multiplié par 3.4 entre 1990 et 2017. Les technologies brevetées portant sur la prévention et le recyclage des plastiques constituent le plus grand groupe de technologies et ont connu la plus forte croissance, à savoir une multiplication par quatre. Le nombre de brevets portant sur de nouvelles technologies liées aux matières premières biosourcées, ou encore à la conversion ou à l'élimination des déchets ou à la réduction et à l'extraction des plastiques rejetés dans le milieu naturel a, quant à lui, triplé.

Graphique 5.2. L'innovation en matière de prévention des plastiques et de recyclage des déchets plastiques a connu la plus forte croissance

Nombre d'inventions brevetées dans le monde en rapport avec l'environnement dans le domaine des plastiques, 1990-2017



Source : calculs à partir de l'analyse textuelle des données tirées de OCDE, Laboratoire de micro-données STI : base de données sur la propriété intellectuelle, <http://oe.cd/ipstats>, juin 2020.

StatLink  <https://stat.link/6s4qcp>

Entre 2012 et 2017, la hausse du nombre de brevets portant sur des technologies pertinente pour l'environnement dans le domaine des plastiques a ralenti. Depuis 2012, le nombre de nouveaux brevets portant sur des technologies en rapport avec la prévention et le recyclage est resté constant, tandis qu'il a légèrement diminué en ce qui concerne les technologies en rapport avec les matières premières biosourcées ainsi que les technologies en rapport avec la conversion ou l'élimination des déchets et la réduction et l'extraction des plastiques rejetés dans l'environnement. Cependant, la sensibilisation du public à la question des rejets de déchets plastiques et l'action politique pour lutter contre ce problème ont progressé depuis 2015, date à laquelle le Plan d'action du G7 contre les déchets marins a été lancé. Il est donc probable que le nombre de brevets ait augmenté depuis lors, mais les données en la matière ne sont pas encore disponibles.

Les données relatives aux marques déposées fournissent davantage de détails sur les innovations en matière de plastiques technologiquement peu avancées. Chaque année entre 2013 et 2017, le nombre de nouvelles marques déposées a été en moyenne de 65 en ce qui concerne les technologies de réemploi des plastiques et de 2 700 en ce qui concerne les technologies de réparation des plastiques. Le nombre de marques déposées portant sur le réemploi des plastiques a augmenté de 23 % par an entre 1955 et 2017, tandis que celui des marques déposées concernant la réparation des plastiques a progressé de 12 % par an.

Depuis 2012, l'innovation en matière de recyclage a évolué plus rapidement que celle dans la prévention des déchets plastiques, comme le montre le nombre quasiment double de brevets déposés en 2017 (Graphique 5.2). L'intérêt croissant pour le recyclage est probablement favorisé par le fait que les consommateurs accordent une attention toujours plus grande aux questions environnementales et consentent à payer un prix plus élevé pour des matières recyclées ; les politiques à responsabilité élargie

des producteurs (REP) qui chargent les producteurs de financer le recyclage des déchets (emballage compris) sont aussi une explication (chapitre 6).

L'innovation dans la prévention et le recyclage des déchets plastiques est certes en hausse depuis 1990, néanmoins sa part au sein de l'ensemble des innovations dans le domaine des plastiques à l'échelle mondiale reste faible. De fait, en 2017, 1.2 % seulement de cette innovation totale portait sur la prévention des déchets et le recyclage, proportion comparable au 1.1 % relevé en 1991. Des politiques nettement plus ambitieuses s'imposent donc pour orienter les avancées technologiques vers le bouclage de la boucle des plastiques.

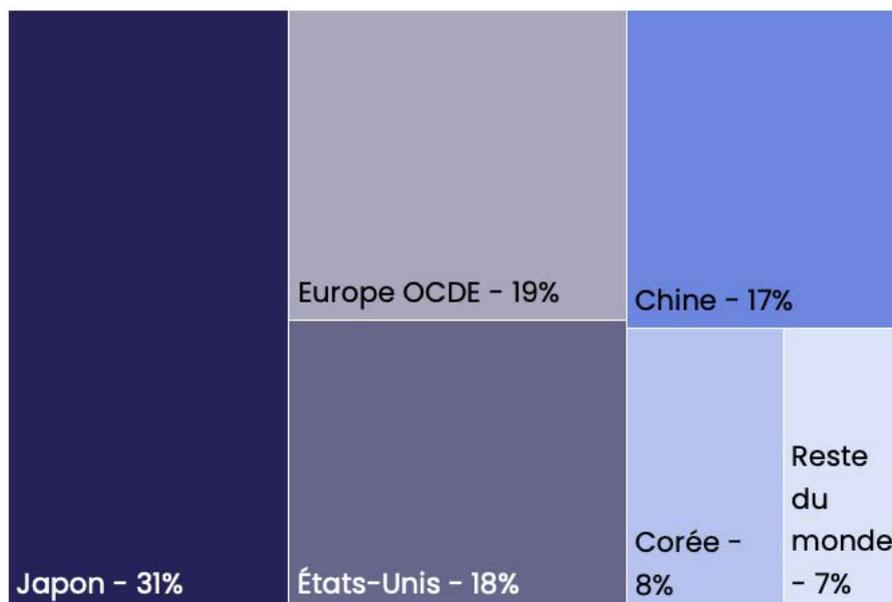
Le reste de la présente section porte sur les technologies de prévention et de recyclage, les matières premières biosourcées (chapitre 2) et les technologies de transformation ou d'élimination des déchets ayant été traitées de manière exhaustive dans les chapitres précédents (voir notamment les encadrés 2.2 et 2.3).

5.1.2. Une innovation dans la prévention des déchets et le recyclage concentrée dans quelques pays seulement

L'innovation en matière de prévention et de recyclage des plastiques (l'innovation pour la circularité des plastiques) n'est pas répartie uniformément dans le monde (Graphique 5.3). La grande majorité est concentrée dans les pays de l'OCDE et en Chine. Par exemple, dix pays seulement étaient responsables de 92 % des brevets relatifs à la prévention et au recyclage des plastiques entre 2010 et 2014, le Japon, les États-Unis, la Chine, la Corée, l'Allemagne et la France représentant à eux seuls 85 % de ces brevets.

Graphique 5.3. Les pays de l'OCDE et la Chine sont en tête de l'innovation en matière de circularité des plastiques

Répartition régionale des inventions brevetées pour la prévention et le recyclage des plastiques (2010-14)



Source : calculs à partir de l'analyse textuelle des données tirées de OCDE, Laboratoire de micro-données STI : base de données sur la propriété intellectuelle, <http://oe.cd/ipstats>, juin 2020.

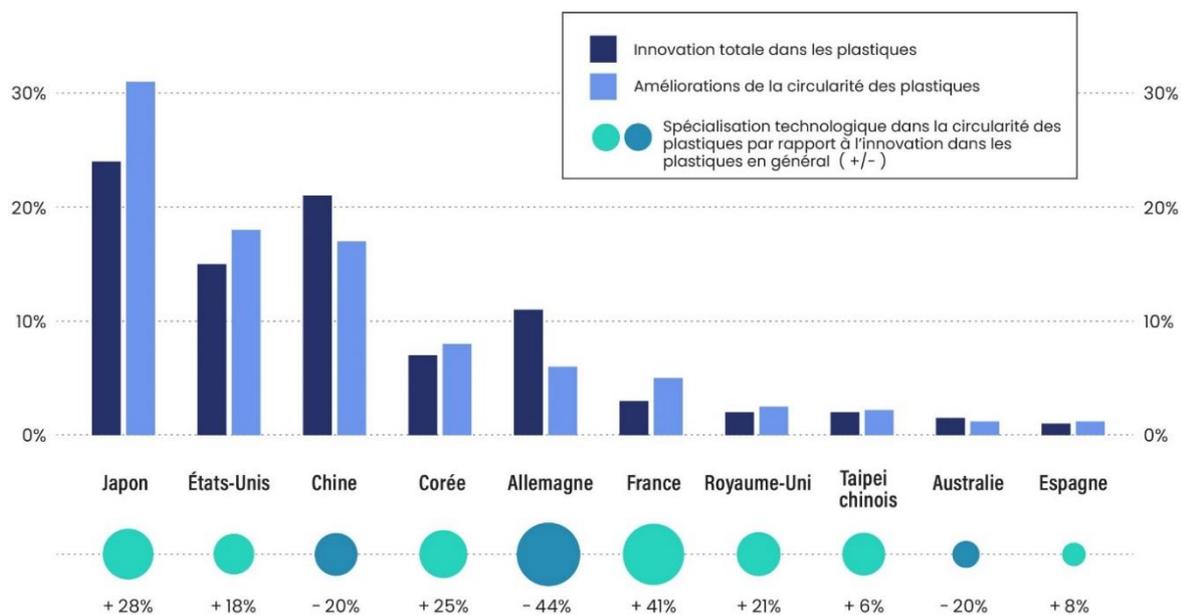
Le Graphique 5.4 examine les dix pays les plus innovants et compare leur part mondiale d'inventions brevetées pour la prévention et le recyclage des plastiques avec leur part mondiale de tous les brevets

relatifs aux plastiques, qu'ils soient en rapport avec l'environnement ou non. Sans surprise, les pays qui innoverent dans le domaine des plastiques en général sont aussi ceux qui tendent à innover dans les technologies qui favorisent la circularité des plastiques. Néanmoins, certains pays déploient des efforts plus importants, en proportion, dans les technologies qui favorisent la prévention et le recyclage des plastiques. Ainsi, la France, le Japon, la Corée, le Royaume-Uni et les États-Unis ont consacré une partie relativement importante de leur innovation à la circularité des plastiques entre 2010 et 2014. En revanche, l'Allemagne, la Chine et l'Australie se sont relativement moins concentrées sur la circularité des plastiques au cours de la même période. Il n'en reste pas moins qu'étant donné leur nombre élevé d'innovations dans le domaine des plastiques, ces trois pays font partie des principaux pays qui déposent des demandes de brevets liés aux plastiques circulaires en nombre absolu. En outre, plusieurs pays vont probablement privilégier de plus en plus les technologies qui favorisent l'utilisation circulaire des plastiques. Par exemple, une interdiction totale d'exportation des déchets entrera en vigueur en Australie à la mi-2024, ce qui augmentera de manière significative la demande intérieure de recyclage des plastiques. Le marché australien en pleine expansion, bénéficiant également d'un investissement public de 190 millions de dollars australiens dans la modernisation du recyclage, devrait stimuler l'innovation dans le recyclage des déchets plastiques.

Cette grande concentration d'innovations en matière de prévention et de recyclage des plastiques met en évidence la nécessité d'accélérer le transfert international de ces technologies vers les pays en développement, où l'emploi des plastiques et les problèmes de rejet des plastiques dans l'environnement connaissent une croissance rapide.

Graphique 5.4. Certains pays sont spécialisés dans l'innovation en matière d'utilisation circulaire des plastiques

Les dix principaux pays qui innoverent dans la prévention et le recyclage des plastiques, part mondiale (2010-14)



Source : calculs à partir de l'analyse textuelle des données tirées de OCDE, Laboratoire de micro-données STI : base de données sur la propriété intellectuelle, <http://oe.cd/ipstats>, juin 2020.

StatLink  <https://stat.link/n39041>

5.2. Quel est le rôle des politiques publiques en matière d'innovation dans la circularité des plastiques ?

Comme on l'a vu, il existe des différences notables entre pays en matière d'innovation dans la circularité des plastiques. Dans la présente section, on cherche à savoir comment les politiques d'économie circulaire contribuent à ces différences, en se basant sur une étude de cas sur le décret allemand sur les emballages – l'un des premiers systèmes de responsabilité élargie des producteurs (REP) portant sur le recyclage et la valorisation des emballages primaires et secondaires dans le monde.

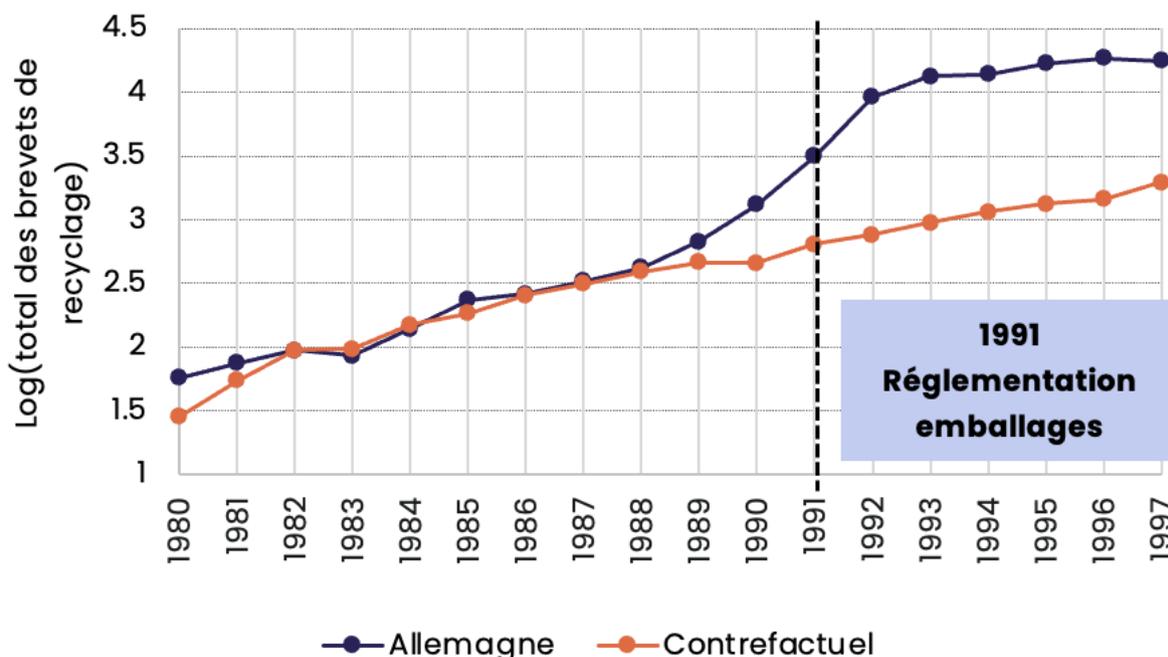
Le décret de 1991 sur les emballages, qui a été remplacé en 2019 par une loi sur les emballages (*Verpackungsgesetz*), imposait aux vendeurs et aux producteurs de récupérer et de recycler un pourcentage donné, mais croissant année après année, de leurs emballages. Le système de récupération a été jugé efficace au vu de la baisse de 500 000 tonnes du volume d'emballages utilisés entre 1992 et 1993.

Trois ans après l'entrée en vigueur de cette réglementation, les capacités de recyclage des plastiques avaient été multipliées par quatre (OCDE, 1998^[31]). Des analyses qualitatives indiquent que cette hausse notable des capacités de recyclage était due aux conséquences positives notables du décret sur l'innovation dans le recyclage des plastiques. Afin d'atteindre les quotas de reprise fixés, les producteurs ont dû imaginer de nouveaux procédés permettant de transformer les déchets plastiques et créer de nouveaux marchés pour les matières secondaires. À l'époque, on trouvait parmi les nouvelles technologies des procédés de recyclage innovants comme les hydrocyclones et les centrifugeuses permettant de séparer les plastiques un par un (OCDE, 1998^[31]).

Afin d'analyser quantitativement l'effet de la réglementation allemande relative aux emballages sur l'innovation dans le recyclage des plastiques, et afin d'établir un lien plus fort qu'une corrélation, une méthode à contrôle synthétique reposant sur une Allemagne contrefactuelle, c'est-à-dire un groupe témoin, a été utilisée³. Ce groupe témoin est composé du Canada, du Japon, des Pays-Bas, de la Corée et des États-Unis. Ces pays sont tous similaires à l'Allemagne en matière de brevets de recyclage, mais aucun d'entre eux n'avait instauré une politique de recyclage similaire vers 1991⁴. À l'aide de plusieurs variables prédictives, les dépôts de brevets portant sur des technologies de recyclage en Allemagne avant l'entrée en vigueur de la réglementation ont pu être répliqués dans le groupe témoin (Graphique 5.5)⁵. Il s'avère que cinq ans après son entrée en vigueur en Allemagne, le décret sur les emballages a augmenté la quantité d'innovations en matière de recyclage de 190 % par rapport au groupe témoin, où il n'est pas entré en vigueur⁶.

Le Graphique 5.5 montre également qu'il y avait déjà eu une poussée de l'innovation en matière de recyclage des plastiques entre 1989 et 1991 en Allemagne. Ce phénomène ne peut pas s'expliquer uniquement par des stratégies de dépôts de brevet avant l'entrée en vigueur du décret, car celui-ci est entré en vigueur très rapidement et aurait donc été difficile à anticiper par la plupart des acteurs. Il pourrait toutefois s'expliquer par le fait que le premier ministre allemand de l'Environnement a mis en place, en 1988, une réglementation sur la consigne des emballages plastiques de boissons, en réaction à l'utilisation massive de bouteilles jetables en polyéthylène téréphtalate (PET). Cela pourrait expliquer la différence observée dès 1988 entre l'Allemagne et le groupe témoin.

Graphique 5.5. Le décret allemand sur les emballages a donné lieu à des innovations dans le domaine du recyclage des plastiques



Note : Le groupe témoin pour l'Allemagne est composé du Canada (28 %), du Japon (12 %), des Pays-Bas (24 %), de la Corée (13 %) et des États-Unis (23 %). Les variables prédictives utilisées sont log(nombre de brevets liés à l'innovation totale dans les plastiques), log(PIB par habitant), log(consommation d'énergie par habitant), log(nombre de brevets liés au recyclage) en 1982, 1984 et 1988. Une invention correspond à une seule famille de brevets. L'année retenue pour l'invention est celle du brevet dont la priorité a été reconnue. Seuls les brevets délivrés sont pris en compte. Les brevets pour recyclage des plastiques comprennent ceux portant sur le recyclage mécanique, le recyclage chimique (solvolyse), le tri et d'autres prétraitements. Les données datant d'avant 1990 ne portent que sur la République fédérale d'Allemagne (RFA).
Source : calculs à partir de l'analyse textuelle des données tirées de OCDE, Laboratoire de micro-données STI : base de données sur la propriété intellectuelle, <http://oe.cd/ipstats>, juin 2020.

StatLink  <https://stat.link/9kfj56>

L'étude de ce cas suggère que les politiques publiques favorables au recyclage des plastiques sont parvenues à déclencher l'innovation dans ce domaine. Cependant, l'effet des politiques actuelles et à venir en faveur de l'économie circulaire sur l'émergence de nouvelles technologies reste à explorer. Les paragraphes qui suivent permettent de faire un pas de côté par rapport aux analyses globales et présentent des tendances récentes dans certains types d'innovations pertinentes pour l'environnement dans le domaine des plastiques. Ils explorent aussi les enseignements à tirer de ces tendances pour l'action publique.

5.3. Quels sont les derniers défis à relever en matière d'innovation ?

5.3.1. L'innovation dans le domaine des plastiques biodégradables ralentit après des décennies de croissance continue

Les plastiques biodégradables ont conquis les consommateurs avec l'idée qu'ils se dégraderaient dans le milieu naturel sous forme de dioxyde de carbone, d'eau et de biomasse⁷. Actuellement, ils sont utilisés dans les emballages, dans l'agriculture, dans l'horticulture, dans l'industrie des textiles et des biens de consommation. La capacité mondiale de production de plastiques biodégradables s'élevait à 1.2 Mt en 2019, soit moins de 0.3 % de la production totale de plastiques (Crevel, 2016^[4] ; European Bioplastics, 2019^[5]).

Le nombre de brevets portant sur des innovations dans le domaine des plastiques biodégradables a doublé entre 1995 et 2017. Entre 2013 et 2017, 228 familles de brevets concernant les plastiques biodégradables ont été délivrées chaque année (Dussaux et Agrawala, 2022^[2]). Cependant, cette tendance ralentit depuis 2013, sans doute en raison de l'impact environnemental des plastiques dits biodégradables qui est devenu un sujet de controverse compte tenu des difficultés inhérentes à leur biodégradation dans l'environnement naturel (Encadré 5.1).

Encadré 5.1. Les plastiques dits biodégradables sont sujets à controverse.

La dégradation microbienne des polymères biodégradables n'est pas facilement réalisable dans un milieu naturel (Wierckx et al., 2018^[6]). Par exemple, certains polymères tels que l'acide polylactique (PLA) ne se biodégradent dans des délais raisonnables que lors d'un compostage industriel à plus de 60 °C (Farah, Anderson et Langer, 2016^[7]). La biodégradation nécessite également des conditions optimales en termes de concentration d'enzymes, de souches de microorganismes, de température, de pH, d'humidité, d'apport en oxygène et de luminosité. Ces conditions optimales sont rarement présentes dans les environnements naturels (Laycock et al., 2017^[8] ; Haider et al., 2019^[9]).

Napper et Thompson (2019^[10]) ont comparé la détérioration de sacs en polyéthylène conventionnels à celle de sacs dits biodégradables, oxo-dégradables ou compostables. L'étude portait sur différents traitements : les sacs ont été maintenus à l'air libre, enfouis dans le sol ou immergés dans le milieu marin. À l'exception du sac compostable en milieu marin, tous les sacs avaient rejeté des fragments dans l'environnement au bout de 27 mois. Plus encore, certains sacs étaient toujours utilisables comme cabas après trois années passées dans le sol ou dans un milieu marin. Le résultat frappant est que les sacs dits biodégradables testés dans l'expérience ne s'étaient pas détériorés plus rapidement que les sacs conventionnels en polyéthylène.

La plupart des études d'écotoxicité ne démontrent aucun effet nocif des produits de la dégradation (Haider et al., 2019^[9]), à deux exceptions notables près qui concernent les PLA. Souza et al. (2013^[11]) ont trouvé des effets cytotoxiques et génotoxiques sur les oignons communs et Adhikari et al. (2016^[12]) ont constaté que l'activité microbienne était inhibée après 84 jours d'incubation dans le sol. Une autre préoccupation concerne l'utilisation de plastiques oxo-dégradables contenant des sels métalliques, ces derniers servant de catalyseurs pour accélérer la dégradation (OCDE, 2013^[13] ; Kershaw, 2015^[14]). La dégradation des plastiques oxo-dégradables peut libérer des micro-fragments de plastiques et de métal dans le milieu naturel, mais les effets sur les sols, l'eau, la flore et la faune restent mal connus. Plusieurs pays ont déjà entrepris de réglementer les plastiques oxo-dégradables. Par exemple, depuis 2015, la France interdit les sacs et emballages en plastique oxo-dégradable, et l'Union européenne interdit les produits en plastique oxo-dégradable depuis 2019.

Outre les questions liées à la biodégradation, d'autres préoccupations sont apparues. Tout d'abord, certains plastiques biodégradables sont produits à partir de polymères biosourcés dont l'impact sur l'environnement est mitigée. Ensuite, si les conditions de collecte et de recyclage ne sont pas adaptées, les plastiques biodégradables peuvent nuire à la qualité des ressources recyclées (Hornitschek, 2012^[15] ; Hann et al., 2015^[16]). En outre, les consommateurs peuvent se tromper et mettre des plastiques non compostables dans les déchets ménagers destinés au compostage. Enfin, la mention biodégradable apposée sur les plastiques pourrait encourager les rejets sauvages de déchets (Kershaw et Rochman, 2015^[17]).

Malgré ces limites, fabriquer des plastiques compostables peut représenter un avantage pour des applications spécifiques. Par exemple, les plastiques des restaurants peuvent être directement compostés avec les déchets alimentaires, sans autre traitement. Par ailleurs, il existe de nombreux types de plastiques

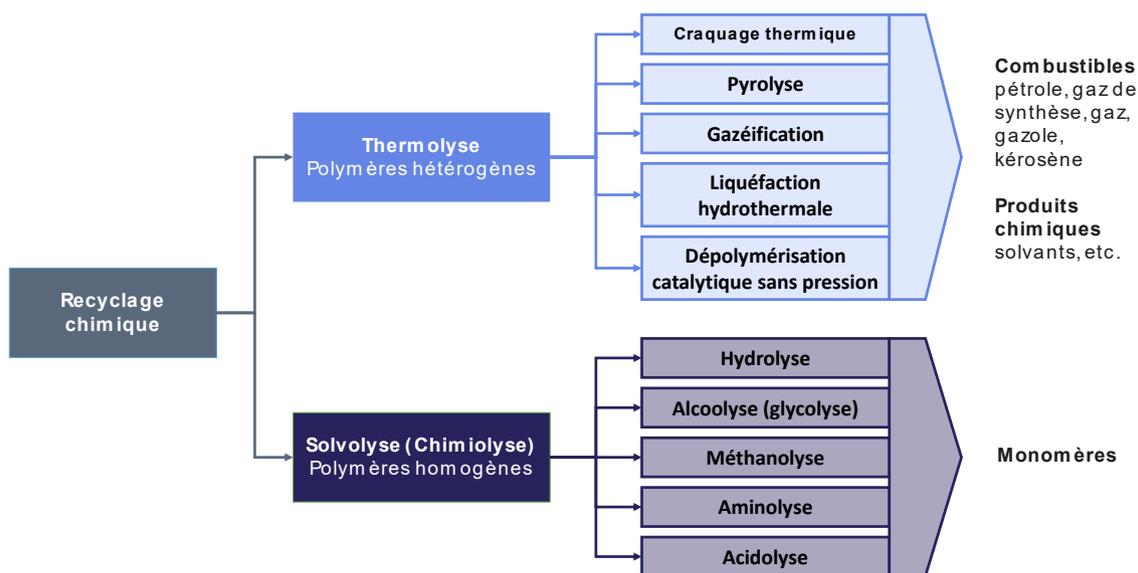
compostables, et l'innovation dans ce secteur pourrait permettre de concevoir de meilleurs polymères et d'envisager de nouvelles applications.

5.3.2. Les débuts du recyclage chimique : des défis considérables

Le recyclage chimique consiste à décomposer, par un procédé chimique, les polymères contenus dans les déchets pour en faire une matière de base dans la production de combustibles ou de nouveaux polymères (Thiounn et Smith, 2020^[18]). Il est différent de l'incinération, qui consiste à récupérer la chaleur produite par la combustion des déchets plastiques. Tout comme pour le recyclage mécanique, le tri et le prétraitement sont essentiels pour optimiser le recyclage chimique.

Le recyclage chimique peut être subdivisé en deux catégories (Graphique 5.6). La première est la transformation des déchets plastiques en combustibles, principalement, via une thermolyse ; on parle aussi de filière « du plastique au carburant ». Les types de procédés thermolytiques sont le craquage thermique, la pyrolyse, la gazéification, la liquéfaction hydrothermale et la dépolymérisation catalytique sans pression (Rahimi et García, 2017^[19])⁸.

Graphique 5.6. Le recyclage chimique : des procédés très divers



La thermolyse des déchets plastiques est pratiquée à haute température, ce qui consomme une grande partie de l'énergie contenue dans les plastiques. Par exemple, la pyrolyse a généralement lieu à 550 °C et a besoin théoriquement de 1 328 MJ par kilogramme de déchets de polyéthylène (PE) pour fabriquer un carburant au pouvoir calorifique d'environ 40 MJ par kilogramme de déchets (Gao, 2010^[20] ; Ripley, 2014^[21] ; Rollinson et Oladejo, 2019^[22]). En raison de cette demande énergétique relativement élevée et de la finalité qui consiste à produire de l'énergie, et non des matériaux, le terme de « recyclage » appliqué à la plupart des procédés de thermolyse fait débat.

Chaque procédé thermolytique présente des conséquences environnementales différentes. Par exemple, d'après Khoo, (2019^[23]) la gazéification de déchets plastiques mélangés nécessite dix fois plus d'énergie, mais émet moins d'oxydes d'azote (NOx), de dioxyde de soufre (SO₂) et de particules que la pyrolyse. Ce résultat s'appuie cependant sur des sources anciennes et devrait faire l'objet de nouvelles études. En s'appuyant sur l'analyse du cycle de vie, Demetrius et Crossin (2019^[24]) ont démontré que la pyrolyse et

la gazéification présentent une incidence moindre sur l'environnement que la mise en décharge, mais une incidence comparable à celle de l'incinération à des fins de valorisation énergétique. Khoo (2019^[23]) démontre que la pyrolyse et la gazéification contribuent moins au changement climatique que l'incinération à des fins de valorisation énergétique, mais favorisent nettement davantage l'acidification des terres et la formation de particules. Dans la même étude, on constate que le recyclage mécanique surpasse largement ces procédés de thermolyse quant aux impacts écologiques.

La seconde catégorie de recyclage chimique est la solvololyse et consiste à transformer des déchets de plastique en plastique neuf. Ce procédé permet de transformer les déchets plastiques en monomères qui deviennent la matière de base de nouveaux polymères (Graphique 5.6). Ces technologies de dépolymérisation chimique comprennent l'hydrolyse, l'alcoololyse, la méthanolyse, la glycolyse et l'aminolyse (BCG, 2019^[25] ; Das et Pandey, 2007^[26]). Ce type de recyclage chimique fait moins débat que la thermolyse, car il pourrait faire baisser la demande en polymères vierges. La solvololyse vise à dépasser le principal obstacle auquel fait face le recyclage mécanique (le décyclage⁹) en produisant des polymères identiques au matériau neuf.

Les procédés de solvololyse commencent tout juste à apparaître et ne sont pas aussi matures que les techniques de la filière thermolytique. Entre 1995 et 2017, le nombre de brevets liés à l'innovation dans le recyclage par solvololyse n'a augmenté que de 5.2 % par an (Dussaux et Agrawala, 2022^[21]). Cela n'est pas surprenant sachant que cela fait peu de temps que le recyclage par solvololyse suscite un intérêt et que les données sur les brevets ne sont donc pas encore tout à fait disponibles. Les acteurs du marché interrogés pour cette étude ont dit s'attendre à ce que la capacité mondiale, portée par des usines pilotes et de démonstration des technologies de solvololyse, augmente jusqu'à atteindre au moins 140 kilotonnes de déchets par an en 2022¹⁰.

L'impact écologique de la solvololyse dépend du polymère, du procédé employé et de facteurs locaux tels que le mix électrique. Une étude a démontré que la solvololyse de polystyrène expansé (PSE) permettait d'éviter l'émission de 3.3 tonnes d'équivalent CO₂ par tonne de produit entrant comparé à l'incinération, cette dernière étant actuellement la principale forme de traitement des déchets de PSE (CE Delft, 2019^[27]). À l'inverse, De Andrade et al. (2016^[28]) ont montré que le recyclage mécanique de l'acide polylactique (PLA) était plus performant que le recyclage chimique par hydrolyse et repolymérisation, tant du point de vue du changement climatique que de la toxicité humaine et de l'épuisement des combustibles fossiles. Le recyclage mécanique consomme 2 649 kJ d'électricité par kilogramme de PLA résiduel, contre 11 211 kJ pour la solvololyse. Une étude néerlandaise a cependant conclu que le recyclage mécanique du PSE avait la même incidence sur le climat que la solvololyse du PSE (Netherlands Institute for Sustainable Packaging, 2018^[29]). Dans une autre étude fondée sur l'analyse du cycle de vie, il est rapporté que le recyclage mécanique de barquettes en PET émet moins de gaz à effet de serre que la dépolymérisation magnétique,¹¹ mais que la différence est faible puisque limitée à 0.7 tonne de CO₂e par tonne de déchets (CE Delft, 2019^[27]).

Cependant, les résultats de ces études fondées sur l'analyse du cycle de vie doivent être considérés avec une grande prudence. Les conséquences sur l'environnement du recyclage par solvololyse ne sont pas encore bien comprises. Un récent examen a établi qu'il est difficile d'acquérir des données de qualité relatives à l'incidence environnementale de ce type de recyclage chimique, en raison de la moindre maturité commerciale du concept de solvololyse (Tabrizi et al., 2020^[30]). En outre, certains acteurs mettent en garde contre l'excès d'enthousiasme envers les procédés de recyclage chimique, car ceux-ci pourraient favoriser l'acceptation des plastiques à usage unique, retardant d'autant la mise au point de technologies de prévention des déchets (Tabrizi et al., 2020^[30]).

5.3.3. De nombreuses innovations apparaissent tout au long de la chaîne de valeur des plastiques

En dehors du recyclage chimique par solvolyse, de nombreuses autres innovations qui visent à répondre aux enjeux écologiques des plastiques sont en train d'apparaître. Certains exemples notables incluent :

- *L'apprentissage automatique pour trier les déchets plastiques* : afin d'améliorer la pureté, les techniques de tri de pointe font à présent intervenir « l'apprentissage profond », c'est-à-dire l'entraînement d'une machine pour qu'elle reconnaisse différents types de plastiques et autres matériaux. Par exemple, l'apprentissage automatique est actuellement utilisé dans le tri des déchets plastiques provenant d'équipements électriques et électroniques, par exemple l'acrylonitrile butadiène styrène (ABS), le polystyrène à haut impact (HIPS), le polypropylène et le polystyrène cristal. Cette technologie est particulièrement utile pour le tri des plastiques sombres que les techniques par infrarouge proche peinent à identifier en raison de l'absorption des rayonnements. La capacité de calcul toujours croissante permettra à l'avenir de mettre en œuvre de nouveaux algorithmes et de nouvelles applications (Tarun, Sreelakshmi et Peeyush, 2019^[31]).
- *La chaîne de blocs (blockchain) pour encourager le recyclage* : le manque de garantie de qualité des plastiques triés constitue une barrière pour les fabricants de plastiques (Chidepatil et al., 2020^[32]). La chaîne de blocs est un outil numérique permettant de suivre des processus de près et de vérifier les informations. Elle pourrait rendre accessible aux fabricants de plastiques les informations dont ils ont besoin si le tri était associé à une intelligence artificielle alimentée par de multiples capteurs et si une grande partie des acteurs de la chaîne d'approvisionnement s'engageaient à travailler ensemble. Par exemple, Radical Innovations Group a mis au point une plateforme par chaîne de blocs qui recourt à des contrats intelligents comprenant des données validées sur la source du déchet, son type, sa couleur, sa quantité, son origine et le procédé de tri qu'il a subi.
- *Un sac de lavage filtrant pour la réduction à la source des rejets de microplastiques* : il est possible de placer les textiles synthétiques ou autres dans le sac de lavage Guppyfriend afin de limiter la perte de microfibrilles pendant le lavage¹². Après lavage, les microfibrilles retenues sont enlevées et jetées dans les déchets ménagers non recyclables. Ce sac de lavage fabriqué en polyamide tissé est simple d'utilisation.
- *Un système autonome de récupération des rejets dans les cours d'eau et océans* : l'Ocean Cleanup Interceptor 2.0 est doté de barrières qui guident les déchets plastiques flottants vers une embarcation collectant les déchets. L'objectif est de récupérer les plastiques rejetés dans les cours d'eau avant qu'ils n'arrivent dans l'océan¹³. L'embarcation fonctionne à l'énergie solaire, est autonome et peut stocker jusqu'à 50 mètres cubes de déchets.
- *De nouveaux modèles de livraison* : l'innovation ne concerne pas que des nouvelles technologies. Loop est un exemple d'innovation organisationnelle d'une entreprise de livraison qui permet d'éviter l'emploi de conditionnements jetables et de réduire l'empreinte environnementale globale du service¹⁴. Loop livre des produits à des acheteurs en ligne en utilisant des conditionnements qui sont ensuite collectés, nettoyés et réutilisés.

5.4. Comment passer de l'innovation au déploiement massif ?

Étant donné la variété des technologies proposées, la question est de savoir lesquelles devraient être développées et déployées à plus grande échelle pour répondre efficacement aux problèmes environnementaux générés par la production et l'utilisation des plastiques. L'utilité d'une technologie dépend fortement du contexte national. Par exemple, le déploiement massif de systèmes de filtration privés ne sera peut-être pas rentable dans les pays qui disposent sur tout le territoire de stations

d'épuration équipées pour capter les microplastiques des eaux usées¹⁵. Dans d'autres pays, en revanche, ces systèmes peuvent être les bienvenus. De plus, la récupération des débris plastiques dans les cours d'eau est plus pertinente dans les pays où les problèmes de gestion des déchets sont les plus prégnants.

L'innovation dans les produits, les procédés et les modèles économiques est essentielle, mais elle ne représente qu'une partie de ce qui est nécessaire. Afin de privilégier les technologies qui favorisent l'emploi circulaire des plastiques et d'inciter fortement les consommateurs et entrepreneurs à prendre ce virage, un ensemble de politiques publiques cohérentes est nécessaire, à savoir notamment des réglementations, des campagnes d'éducation et d'information visant à induire des changements de comportement. Les innovations seront déployées massivement que s'il existe une forte demande du marché. À l'aide d'obligations réglementaires et d'incitations financières, les pouvoirs publics peuvent créer les conditions de marché qui faciliteront l'adoption de technologies circulaires chez les consommateurs et les producteurs. De plus, ils devront intervenir en amont pour freiner la consommation globale en ressources. Ces questions en termes de politiques publiques font l'objet du chapitre suivant.

Références

- Adhikari, D. et al. (2016), « Degradation of bioplastics in soil and their degradation effects on environmental microorganisms », *Journal of Agricultural Chemistry and Environment*, vol. 5/1, p. 23. [12]
- BCG (2019), *A Circular Solution to Plastic Waste*. [25]
- CE Delft (2019), « Exploratory study on chemical recycling. Update 2019. What are the opportunities for climate policy, now in the future? ». [27]
- Chidepatil, A. et al. (2020), « From Trash to Cash: How Blockchain and Multi-Sensor-Driven Artificial Intelligence Can Transform Circular Economy of Plastic Waste? », *Administrative Sciences*, vol. 10/2. [32]
- Crevel, R. (2016), « Bio-based food packaging in Sustainable Development: Challenges and opportunities to utilize biomass residues from agriculture and forestry as a feedstock for bio-based food packaging », *FAO*. [4]
- Das, S. et S. Pandey (2007), « Pyrolysis and catalytic cracking of municipal plastic waste for recovery of gasoline range hydrocarbons », *Thèse de doctorat, National Institute of Technology Rourkela*. [26]
- De Andrade, M. et al. (2016), « Life cycle assessment of poly (lactic acid)(PLA): comparison between chemical recycling, mechanical recycling and composting. », *Journal of Polymers and the Environment*, vol. 24/4, pp. 372-384. [28]
- Demetrious, A. et E. Crossin (2019), « Life cycle assessment of paper and plastic packaging waste in landfill, incineration, and gasification-pyrolysis », *Journal of Material Cycles and Waste Management*, vol. 21/4, pp. 850-860. [24]
- Dussaux, D. et S. Agrawala (2022), « Quantifying environmentally relevant and circular plastic innovation : Historical trends, current landscape and the role of policy », *OECD Environment Working Papers*, n° 199, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/1f6dbd07-en>. [2]

- European Bioplastics (2019), *Bioplastics market data 2019 - Global production capacities of bioplastics 2019-2024*. [5]
- Farah, S., D. Anderson et R. Langer (2016), « Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications—A comprehensive review. », *Advanced drug delivery reviews*, vol. 107, pp. 367-392. [7]
- Gao, F. (2010), « Pyrolysis of Waste Plastics into Fuels », *A Thesis, University of Canterbury*.. [20]
- Haider, T. et al. (2019), « Plastics of the future? The impact of biodegradable polymers on the environment and on society », *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 58/1, pp. 50-62. [9]
- Hann, S. et al. (2015), « The Impact of the Use of « Oxo-degradable » Plastic on the Environment », *Final Report for the European Commission DG Environment. Project conducted under Framework Contract No ENV.A.2/FRA/2015/0008 and 07.0201/2016/748104/ETU/ENV.B.3*. [16]
- Hornitschek, B. (2012), « Impact of degradable and oxydegradable plastics carrier bags on mechanical recycling », *Report by the Transfer Center for Polymer Technology (TCKT) on behalf of the European Plastic Converters (EuPC)*, p. 22. [15]
- Kershaw, P. (2015), « Biodegradable Plastics & Marine Litter: Misconceptions, Concerns and Impacts on Marine Environments », *PNUE GPA*. [14]
- Kershaw, P. et C. Rochman (2015), « Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: a global assessment. », *Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection (GESAMP)*, vol. 93. [17]
- Khoo, H. (2019), « LCA of plastic waste recovery into recycled materials, energy and fuels in Singapore », *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 145, pp. 67-77. [23]
- Law, K. et al. (2020), « The United States' contribution of plastic waste to land and ocean », *Science Advances*, vol. 6/44, <https://doi.org/10.1126/sciadv.abd0288>. [36]
- Laycock, B. et al. (2017), « Lifetime prediction of biodegradable polymers », *Progress in Polymer Science*, vol. 71, pp. 144-189. [8]
- Merrington, A. (2017), « Recycling of Plastics », dans *Applied Plastics Engineering Handbook : Processing, Materials, and Applications : Second Edition*, Elsevier Inc., <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-39040-8.00009-2>. [35]
- Napper, I. et R. Thompson (2019), « Environmental deterioration of biodegradable, oxo-biodegradable, compostable, and conventional plastic carrier bags in the sea, soil, and open-air over a 3-year period », *Environmental science & technology*, vol. 53/9, p. 47. [10]
- Narin, F. (1995), « Patents as indicators for the evaluation of industrial research output », *Scientometrics*, vol. 34/3, pp. 489-496. [1]
- Netherlands Institute for Sustainable Packaging (2018), « Chemical recycling of plastic packaging materials. Analysis and opportunities for upscaling ». [29]
- OCDE (2013), « Policies for Bioplastics in the Context of a Bioeconomy », *OECD Science, Technology and Industry Policy Papers*, n° 10, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/5k3xpf9rrw6d-en>. [13]

- OCDE (1998), « Extended Producer Responsibility Phase 2: Case study on the German packaging ordinance » [3]
- Rahimi, A. et J. García (2017), « Chemical recycling of waste plastics for new materials production », *Nature Reviews Chemistry*, vol. 1/6, pp. 1-11. [19]
- Ren, D. (2020), *China boosts face mask production capacity by 450 per cent in a month, threatening a glut scenario*, South China Morning Post, <https://www.scmp.com/business/companies/article/3075289/china-boosts-face-mask-production-capacity-450-cent-month>. [34]
- Ripley, J. (2014), « Routine Caol and Coke Analysis: Collection, Interpretation, and Use of Analytical Data MNL57-2ND (2nd Edn), Chapter 5: Proximate Analysis », *ASTM International, West Conshohocken*, pp. 29-48. [21]
- Rollinson, A. et J. Oladejo (2019), « 'Patented blunderings', efficiency awareness, and self-sustainability claims in the pyrolysis energy from waste sector », *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 141, pp. 233-242. [22]
- Souza, P. et al. (2013), « PLA and organoclays nanocomposites: degradation process and evaluation of ecotoxicity using *Allium cepa* as test organism », *Journal of Polymers and the Environment*, vol. 21/4, pp. 1052-1063. [11]
- Tabrizi, A. et al. (2020), « Understanding the Environmental Impacts of Chemical Recycling – ten concerns with existing life cycle assessments », *Zero Waste Europe, Bruxelles*. [30]
- Tarun, K., K. Sreelakshmi et K. Peeyush (2019), « Segregation of Plastic and Non-plastic Waste using Convolutional Neural Network », *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 561/1, p. 012113. [31]
- Thiounn, T. et R. Smith (2020), « Advances and approaches for chemical recycling of plastic waste », *Journal of Polymer Science*, vol. 58/10, pp. 1347-1364. [18]
- Wang, C. et al. (2020), « Structure of the global plastic waste trade network and the impact of China's import Ban », *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 153, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104591>. [33]
- Wierckx, N. et al. (2018), « Plastic biodegradation: Challenges and opportunities », *Consequences of Microbial Interactions with Hydrocarbons, Oils, and Lipids Biodegradation and Bioremediation*, pp. 1-29. [6]

Notes

¹ Une famille de brevets est une collection de demandes de brevet couvrant un contenu technique identique ou similaire. Voir Dussaux et Agrawala (2022^[2]) pour plus de détails concernant la méthodologie et les avantages et inconvénients des données issues des brevets.

² Cela étant, les données relatives au brevets restent l'outil préféré, car elles couvrent toutes les catégories d'innovation, contrairement aux données relatives aux marques déposées, qui ne permettent de suivre que quelques domaines.

³ Voir Dussaux et Agrawala (2022^[2]) pour les détails de la méthodologie.

⁴ L'Autriche et la France sont exclues, car elles ont mis en place un système de responsabilité élargie des producteurs d'emballages en 1993 ; la Suède est également exclue, car elle a mis en place une réglementation REP en 1994.

⁵ Les variables prédictives utilisées sont log(nombre de brevets liés à l'innovation totale dans les plastiques), log(PIB par habitant), log(consommation d'énergie par habitant), log(nombre de brevets liés au recyclage) en 1982, 1984 et 1988.

⁶ Les variables prédictives sont bien équilibrées entre l'Allemagne et le groupe témoin. Le résultat est robuste même lorsque le traitement est anticipé de cinq ans. Les tests de permutation sur le contrefactuel montrent que la hausse est significativement différente de zéro. Le résultat est également robuste lorsque l'on exclut un à la fois tous les pays du contrefactuel, sauf le Canada. Une analyse similaire n'a révélé aucun effet statistiquement significatif de la réglementation relative aux emballages sur l'innovation totale dans le domaine des plastiques. Voir Dussaux et Agrawala (2022^[2]) pour les détails de la méthodologie.

⁷ La norme européenne EN 13432 définit la biodégradabilité comme la capacité d'atteindre 90 % de biodégradation en moins de six mois. La désintégration est atteinte si la masse totale des résidus supérieurs à 2 mm est inférieure à 10 % de la masse initiale.

⁸La dépolymérisation catalytique sans pression est aussi connue sous le nom de *Katalytische Drucklose Verölung (KDV)*.

⁹ Le décyclage se produit lorsque, pendant le recyclage mécanique, des déchets plastiques contaminés sont fondus en une nouvelle matière première dont les propriétés sont inférieures à celles du produit plastique d'origine. Par exemple, les déchets plastiques d'une brique de lait ne peuvent pas être réemployés dans la production d'une nouvelle brique, mais seulement dans des applications moins exigeantes telles qu'une couche de conditionnement pour détergent.

¹⁰ Tous les acteurs n'ayant pas été entendus, cette estimation doit être considérée avec prudence.

¹¹ La dépolymérisation magnétique est une technologie mise au point par la start-up néerlandaise Ioniqa et consiste à dépolymériser le PET chimiquement à l'aide d'un fluide magnétique. La dépolymérisation magnétique du PET permet d'éliminer divers colorants et contaminants des déchets en PET et de produire un équivalent vierge, le BHET, utilisable comme matière première dans la production de PET (<https://ioniqa.com/>).

¹² La marque Guppyfriend a été déposée auprès de l'EUIPO en décembre 2018 et auprès de l'USPTO en mai 2020. L'Office européen des brevets (OEB) a délivré un brevet pour le Guppyfriend en novembre 2019. Des demandes de brevet ont également été déposées au Japon et aux États-Unis.

¹³ La marque Interceptor a été déposée auprès de l'EUIPO en avril 2019.

¹⁴ Pour de plus amples informations, consulter : <https://loopstore.com/how-it-works>.

¹⁵ La gestion des microplastiques récupérés dans les stations d'épuration reste un problème, car les boues sont la plupart du temps utilisées dans l'agriculture (chapitre 2).



Extrait de :

Global Plastics Outlook

Economic Drivers, Environmental Impacts and Policy Options

Accéder à cette publication :

<https://doi.org/10.1787/de747aef-en>

Merci de citer ce chapitre comme suit :

OCDE (2023), « Innovation dans le domaine des plastiques », dans *Global Plastics Outlook : Economic Drivers, Environmental Impacts and Policy Options*, Éditions OCDE, Paris.

DOI: <https://doi.org/10.1787/45182f0f-fr>

Cet ouvrage est publié sous la responsabilité du Secrétaire général de l'OCDE. Les opinions et les arguments exprimés ici ne reflètent pas nécessairement les vues officielles des pays membres de l'OCDE.

Ce document, ainsi que les données et cartes qu'il peut comprendre, sont sans préjudice du statut de tout territoire, de la souveraineté s'exerçant sur ce dernier, du tracé des frontières et limites internationales, et du nom de tout territoire, ville ou région. Des extraits de publications sont susceptibles de faire l'objet d'avertissements supplémentaires, qui sont inclus dans la version complète de la publication, disponible sous le lien fourni à cet effet.

L'utilisation de ce contenu, qu'il soit numérique ou imprimé, est régie par les conditions d'utilisation suivantes :

<http://www.oecd.org/fr/conditionsdutilisation>.