



S Y S T E M I Q

Circularité des emballages et textiles en PET/ polyester en Europe

– Synthèse des recherches publiées

Février 2023

À propos de ce rapport de synthèse

Ce rapport de synthèse est le premier d'une série explorant les voies de circularité pour le PET/polyester.

Il s'appuie sur des rapports et des recherches déjà publiés pour évaluer l'état actuel de la circularité du PET/polyester en Europe et explorer le rôle que le recyclage chimique - actuellement faiblement utilisé - pourrait jouer en complément du recyclage mécanique, de la réutilisation et d'autres approches d'économie circulaire. L'équipe de l'étude serait heureuse de recevoir des questions, des contestations potentielles ou des informations et données complémentaires issues d'études publiées ou en cours qui ne sont pas référencées dans ce document. Veuillez nous contacter à l'adresse plastic@systemiq.earth.

Le prochain rapport de la série sera publié dans les mois à venir. Il fournira une nouvelle base de données, explorant le potentiel de complémentarité du recyclage mécanique et chimique du PET en Europe selon différents scénarios. Il quantifiera les flux de matières et les impacts environnementaux de chaque scénario et, ce faisant, contribuera à répondre à certaines des principales lacunes de la recherche existante, identifiées dans ce document.

À propos de Systemiq

Systemiq a été fondé en 2016 pour favoriser la réalisation de l'Accord de Paris et des Objectifs de développement durable de l'ONU, en transformant les marchés et les modèles d'affaires dans quatre systèmes clés : l'utilisation des terres, les matériaux circulaires, les énergies propres et la finance durable. Certifié B Corp, Systemiq s'efforce de débloquent des opportunités économiques qui profitent aux entreprises, à la société et à l'environnement ; la société le fait en établissant des partenariats avec l'industrie, les institutions financières et gouvernementales, et la société civile.

En 2020, Systemiq et The Pew Charitable Trusts ont publié **"Breaking the Plastic Wave: A Comprehensive Assessment of Pathways Towards Stopping Ocean Plastic Pollution"** – un modèle inédit du système mondial des plastiques qui décrit comment réduire radicalement la pollution plastique des océans. En 2022, Systemiq a publié **"ReShaping Plastics"**, qui décrit les voies vers un système de plastique circulaire et neutre pour le climat en Europe. Pour en savoir plus, consultez le site www.systemiq.earth/.

Avis de non-responsabilité

Ce rapport a été préparé par Systemiq avec les conseils stratégiques d'un groupe de pilotage indépendant composé de représentants du secteur public, de la société civile et de l'industrie. Bien que le rapport ait été financé par Eastman et Interzero, le groupe de pilotage a contribué à garantir son indépendance et son impartialité. La responsabilité des informations et des points de vue exposés dans cette publication incombe à l'auteur. Les membres du groupe de pilotage ou les bailleurs de fonds ne peuvent être tenus responsables de l'usage qui pourrait être fait des informations contenues ou exprimées dans ce document. Les déclarations et les opinions présentées dans ce rapport ne reflètent pas nécessairement celles des personnes ou des organisations associées à ce projet.



Comité de pilotage



Antonino Furfari
Managing Director,
Plastics Recyclers Europe



Davide Tonini
Scientific Officer,
European Commission Joint Research Centre



Jacco de Haas
Chief Commercial Officer,
Interzero



Joan Marc Simon
Executive Director,
Zero Waste Europe



Kate Daly
Managing Director,
Closed Loop Partners



Professeur Kim Ragaert
Full Professor – Chair of Circular Plastics,
Maastricht University



Sandeep Bangaru
Vice President,
Circular Economy Platforms, Eastman

D'autres membres du groupe de pilotage pourront être ajoutés pour soutenir la prochaine étape du projet.

L'équipe Systemiq

Alexandre Kremer
Associate

Andrea Bath
Associate

Ben Dixon
Partner and Head of Materials & Circular Economy

Daniel Nima
Associate

Dario Mauth
Associate

Juan Pablo Trespalacios Miranda
Associate

Robert Wilson
Associate

Ulrike Stein
Associate

Yoni Shiran
Partner

Synthèse

Depuis sa découverte, dans les années 1940, la molécule de polyéthylène téréphtalate (PET) est devenue une composante essentielle de la fabrication des emballages plastiques et des textiles polyester. Son utilisation est précieuse dans de nombreux secteurs, dont ceux de l'alimentation, des soins de santé, de l'équipement de la maison et des fibres synthétiques utilisées entre autres pour les vêtements.

Afin de réduire les déchets plastiques, la pollution aux microplastiques et les émissions de gaz à effet de serre (GES), les gouvernements, la société civile et l'industrie ont privilégié ces dix dernières années les secteurs des emballages plastiques et des textiles, comme archétypes pour l'application de diverses approches de l'économie circulaire, dont celles prises en compte dans la présente synthèse : réduction des emplois de matériaux non indispensables, réutilisation des produits ou des emballages, recyclage mécanique et chimique, reconception des produits et des emballages pour les rendre plus durables ou mieux adaptés à la réutilisation et au recyclage, et remplacement de es matériaux par d'autres plus performants du point de vue environnemental.



Cette étude de synthèse met en avant trois conclusions tirées de la recherche :

1. En Europe aujourd'hui, le système PET/polyester est essentiellement non circulaire et dépend principalement de la production vierge à partir de matières premières à base fossile.
2. Pour le PET/polyester, les technologies de recyclage chimique sont de nature à pouvoir augmenter la circularité en complétant le recyclage mécanique et en permettant le recyclage à valeur ajoutée des déchets plastiques difficiles à recycler, pour les transformer en PET/polyester recyclé de haute qualité.
3. L'application complémentaire du recyclage mécanique, du recyclage chimique et de la réutilisation dans le système PET/polyester peut permettre d'optimiser les bénéfices environnementaux et socioéconomiques.

1.

En Europe aujourd'hui, le système PET/polyester est essentiellement non circulaire et dépend surtout de la production vierge à partir de matières premières à base fossile.

Le PET/polyester est l'un des trois plus grands types de plastiques les plus consommés en Europe, avec près de 7 à 8 Mt consommées chaque année¹⁻³. Ce matériau est le plastique primaire qu'on utilise pour fabriquer les bouteilles en plastique à usage unique, les barquettes pour aliments et les textiles synthétiques.

- **En moyenne, les trois quarts de l'ensemble du PET/polyester qui est mis sur le marché finissent sous la forme de déchets et ne sont pas recyclés** (ces déchets sont mis à la décharge, incinérés avec récupération d'énergie ou abandonnés)². Plus des trois quarts du nouveau PET/polyester utilisé chaque année proviennent donc de matières premières à base fossile (pétrole brut et gaz naturel).
- **En Europe, les bouteilles pour boissons représentent un peu moins de la moitié de la consommation de PET/polyester. Le reste sert principalement à la fabrication de textiles (~35 %) et de barquettes (~15 %, y compris des « récipients » et des « tubes », suivant les différentes définitions locales de ces termes)². Moins de 10 % de l'ensemble des textiles polyesters et de 20 % des barquettes pour aliments en PET qui sont mis sur le marché sont recyclés^a.**
- **En Europe, la réutilisation des emballages en PET n'est pas largement répandue**, hormis pour certaines applications, telles que les systèmes de réutilisation des bouteilles pour boissons en PET qui existent en Allemagne et dont la production représente 15 % de l'ensemble des bouteilles du segment de l'eau⁴. En Europe, la revente des vêtements en polyester sur les marchés des articles de seconde main englobe environ 20 % de l'ensemble des volumes de textiles ménagers des consommateurs^{b,5}.
- **Les taux actuels de recyclage du PET/polyester sont atteints principalement via le recyclage mécanique des bouteilles en PET** (lavage, fusion et remoulage en nouveaux produits). Les bouteilles pour boissons en PET transparentes conviennent bien au recyclage mécanique, dont les taux de recyclage moyens pour ce type de bouteilles font partie des plus élevés de l'industrie (50 à 55 %)² (contre 32 à 38 % officiellement pour l'ensemble des emballages plastiques^{6,7}). Les taux de recyclage de ces mêmes bouteilles pour boissons en PET transparentes dépassent même les 90 % dans les pays qui disposent de systèmes de consigne performants (ex : Allemagne ou Norvège)⁴. En Europe, sur les 50 à 55 % de bouteilles en PET qui sont recyclées, **environ un tiers sont recyclées en nouvelles bouteilles et le reste en autres applications, telles que des textiles et des barquettes**. Par conséquent, environ 17 % des bouteilles qui sont mises sur le marché sont recyclées en autres bouteilles². La dynamique de marché actuelle, suivant laquelle davantage de bouteilles sont recyclées en autres applications qu'en nouvelles bouteilles, s'explique en partie par les traitements qui sont impératifs pour respecter les spécifications du PET recyclé, et par la relative propension à payer pour du PET recyclé.
- **Les politiques gouvernementales^c et les engagements volontaires^{8,9} des entreprises des secteurs des biens de consommation et de la mode incitent fortement à recycler davantage le PET/polyester, en particulier pour des applications pour produits sensibles (*contact-sensitive*).** Les gouvernements mettent en place des mesures d'accompagnement, telles que des exigences d'écoconception, la collecte sélective des emballages et des textiles et le financement à partir de dispositifs en matière de responsabilité élargie du fabricant¹⁰⁻¹³. Les prix de marché du PET recyclé destiné à des applications pour produits sensibles sont élevés (souvent supérieurs à ceux du PET vierge), ce qui indique que la demande est forte et que l'offre est contrainte par le système de recyclage du PET actuel. La réalisation des objectifs de ces politiques et de ces engagements volontaires et la demande de l'industrie vont nécessiter au cours des prochaines années une rapide mise à l'échelle de la fourniture de PET/polyester recyclé de haute qualité, ainsi que l'expansion des systèmes de collecte et de tri du PET/polyester pour le recyclage et pour réduire le plus possible la contamination du matériau.

a Ces chiffres correspondent à la part de ces articles qui sont disponibles pour le recyclage.^{4,5,28} Les taux de recyclage réels ne sont pas publiés mais sont a priori très nettement inférieurs.
b On estime à 38 %, en Europe, la part de l'ensemble des vêtements qui sont collectés sélectivement une fois que les consommateurs cessent de les porter, 55 % de ces vêtements collectés étant ensuite vendus sous la forme de textiles pouvant à nouveau être portés⁵.
c Exemples : Règlement sur les emballages et déchets d'emballages (PPWR), Loi Anti-gaspillage en France.

2.

Pour le PET/polyester, les technologies de recyclage chimique sont de nature à pouvoir augmenter la circularité en complétant le recyclage mécanique et en permettant le recyclage à valeur ajoutée des déchets plastiques difficiles à recycler, pour les transformer en PET/polyester recyclé de haute qualité.

Les technologies de recyclage chimique reposent sur des processus de fabrication chimiques qui permettent de recycler le

- **La structure moléculaire du PET/polyester convient particulièrement à un type de recyclage chimique appelé la dépolymérisation.** La dépolymérisation consiste à décomposer les déchets PET/polyester pour revenir à leurs précurseurs chimiques, les monomères, que l'on repolymérise ensuite en PET ou en polyester recyclé de qualité vierge.
- **Les analyses du cycle de vie indiquent qu'en Europe la dépolymérisation permet de générer moins d'émissions de GES que n'en génèrent les filières conventionnelles de la fabrication du PET et de l'élimination des déchets, même si elle génère davantage d'émissions de GES que le recyclage mécanique.** La dépolymérisation a le potentiel nécessaire pour compléter le recyclage mécanique, dans la mesure où elle permet de traiter de nombreux produits en PET/polyester difficiles à recycler, pour les transformer en PET recyclé de haute valeur à l'aide des technologies mécaniques actuelles. Ces produits sont notamment des barquettes, des bouteilles colorées et des textiles, ainsi que des déchets de PET issus du processus de recyclage mécanique.

- **Le PET convient à la fois au recyclage mécanique et au recyclage chimique et présente des avantages incomparables pour l'application complémentaire de ces technologies, par rapport aux autres plastiques.** Contrairement au PET, le recyclage chimique des plastiques polypropylène et polyéthylène repose sur des technologies de pyrolyse ou de gazéification (généralement plus énergivores et à moindres rendements pour le recyclage de matière-à-matière que la dépolymérisation) ou sur le recyclage à base de solvants (classé en tant que « nouvelle technologie », ce qui nécessite un processus de conformité spécifique pour la production de matériaux recyclés plastiques dit sensibles ou destinés à entrer en contact avec des denrées alimentaires sur le marché de l'UE)^d.
- **Il est nécessaire, pour atteindre des taux de recyclage globaux élevés et s'écarter des matières premières à base fossile, de procéder à la mise à l'échelle du recyclage chimique du PET/polyester parallèlement au recyclage mécanique.** L'industrie et un certain nombre d'études nous disent que les boucles de recyclage mécanique répétées ou contaminées peuvent dégrader les propriétés fonctionnelles et la couleur du plastique recyclé. Les limites techniques de la multiplication des boucles de recyclage mécanique n'ont pas été bien étudiées, et

une étude en laboratoire suggère que pour maintenir la performance du polymère, il faudrait ajouter 25 % de PET équivalent vierge au PET recyclé. En conditions réelles, le pourcentage de « recharge » en PET équivalent vierge nécessaire pour maintenir la performance dans le temps peut dépasser les 25 %. Il faut encore approfondir la recherche. Le recyclage chimique du PET est une source potentielle de PET équivalent vierge¹⁴.

- **Des installations de dépolymérisation du PET/polyester à une échelle industrielle ont été annoncées en Europe.** Sont notamment attendues celles d'Eastman (160 000 tonnes par an)¹⁵, d'Axens / Toray Films Europe (80 000 tonnes par an)¹⁶, d'Infinite Loop / Groupe Suez (70 000 tonnes par an)¹⁷ et de Carbios / Indorama Ventures (50 000 tonnes par an)¹⁸, toutes devant être situées en France, et l'installation d'Ioniqa, aux Pays-Bas (10 000 tonnes par an)¹⁹.

N. b. : La capacité annoncée de production des procédés de dépolymérisation est basée sur des informations accessibles au public qui ne permettent pas de savoir si les projets ont obtenu une autorisation finale d'investissement.

d Le recyclage à base de solvants, qui est parfois considéré comme un recyclage chimique (par exemple, par la Commission européenne), est classé en tant que « nouvelle technologie » selon la réglementation de l'UE n° 2022/1616 ; les technologies de dépolymérisation ne seraient pas tenues de se conformer au règlement de l'UE n° 2022/1616 en supposant qu'elles puissent produire des monomères régis par le règlement n° 10/2011 à des niveaux de pureté élevés.

3.

L'application complémentaire du recyclage mécanique, du recyclage chimique et de la réutilisation dans le système PET/polyester peut permettre d'optimiser les bénéfices environnementaux et socioéconomiques.

Les études montrent que pour bâtir une économie circulaire pour les emballages en PET et les textiles polyesters, il n'existe pas de solution miracle.

- **Les efforts de réduction sont essentiels, mais pour éviter des conséquences environnementales ou sociales non voulues**, telles que le gaspillage alimentaire ou des impacts sur le climat, **ces efforts doivent être déployés de façon sélective**. La mise à l'échelle de la réutilisation/revente (y compris des produits en PET/polyester réutilisables) peut jouer un rôle non négligeable, mais demeure limitée par

le besoin d'évolution des comportements des consommateurs, et d'infrastructures. Les mesures de substitution sont elles aussi importantes pour réduire les émissions de GES, que le matériau de substitution soit du PET/polyester ou non.

- **Le recyclage mécanique est une technologie éprouvée qu'il est possible de mettre à l'échelle, mais elle ne permet pas de convertir facilement certains produits en PET/polyester en PET recyclé de haute valeur ou pour produits sensibles** et nécessitera un apport continu de PET équivalent vierge pour pouvoir maintenir la performance du polymère à l'échelle.
- **Le recyclage chimique du PET/polyester n'est pas non plus une solution miracle**. Des rapports de recherche soulignent qu'il serait possible, en application complémentaire, de déployer le recyclage mécanique, le recyclage chimique et la réutilisation dans le système PET/polyester. Cela pourrait permettre d'atteindre des taux de recyclage élevés, d'augmenter l'approvisionnement en PET recyclé de haute valeur et pour produits sensibles, de réduire les émissions de gaz à effet de serre, les volumes de déchets plastiques et la pollution environnementale et de favoriser le développement industriel et la création d'emplois verts. La réalisation de cette vision circulaire aurait aussi valeur d'exemple pour l'application complémentaire des approches de l'économie circulaire à d'autres composantes des filières de l'emballage et des textiles, et au-delà.



D'une façon générale, le passage en revue de plus de 80 rapports de recherche n'a pas permis de mettre au jour une étude de modélisation au niveau système, pour le système PET/polyester, qui permettrait d'évaluer au niveau système les impacts environnementaux de différents scénarios pour l'application complémentaire de la réduction, la réutilisation, la substitution, le recyclage mécanique et le recyclage chimique. Cette tâche sera traitée dans un rapport complémentaire dont la publication est prévue pour 2023.

Méthodologie

Une revue de la littérature a été menée, qui a porté sur plus de 80 études pertinentes publiées dans des revues universitaires visées par des pairs, ainsi que dans des publications d'agences gouvernementales, de sociétés de conseil, de groupes de réflexion et d'organisations de la société civile.

Les éclairages tirés de ces recherches, qui sont restitués dans le présent article de synthèse, forment un résumé de ce qui est connu et de ce qui ne l'est pas, et mettent en exergue les principales questions qu'il reste à traiter dans des études ultérieures sur le système circulaire du PET en Europe. Ces éclairages ont été vérifiés par rapport à de multiples études ou auprès d'experts du secteur. Outre de nombreux articles universitaires visés par des pairs et portant sur différentes composantes du système, neuf études couvrant l'ensemble du système se sont révélées particulièrement pertinentes pour la présente synthèse :



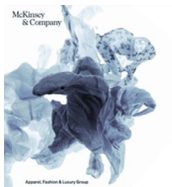
Systemiq (2022)



Eunomia (2022)



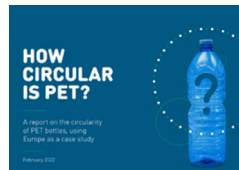
McKinsey & Global Fashion Agenda (2020)



McKinsey (2022)



Eunomia (2020)



Eunomia & Zero Waste Europe (2022)



Systemiq & Pew Charitable Trusts (2020)



Ellen MacArthur Foundation (2016)



Closed Loop Partners (2021)



Ensemble de publications universitaires fondamentales sur le recyclage du PET



Les éclairages de la recherche restitués dans le présent article de synthèse ont été vérifiés par rapport à de multiples études ou auprès d'experts du secteur.

Sommaire

1. État des lieux pour les emballages en PET et les textiles en polyester en Europe	10
2. Nouvelles évolutions pour le recyclage du PET/polyester	23
3. Éclairages de la recherche pour des approches de l'économie circulaire complémentaires dans le système PET/polyester	30



État des lieux

**pour les emballages en PET et
les textiles en polyester en Europe**

1.1

Présentation du PET/polyester

Les plastiques sont des matériaux appréciés, qui sur ces dernières décennies ont joué un rôle de plus en plus central dans nos secteurs de l'alimentation, des produits de consommation, des soins de santé, des textiles, de l'automobile et de la construction.

Par sa durabilité, ses propriétés barrières et sa légèreté, la molécule de plastique PET a démontré tout particulièrement son utilité dans les applications liées à l'emballage (ex : bouteilles pour boissons et barquettes pour aliments). Cette molécule est toute aussi précieuse sous la forme d'une fibre polyvalente et peu onéreuse, pouvant être tissée en textiles et utilisée dans les vêtements, les moquettes, les équipements de la maison et les automobiles.

Le PET/polyester représente environ 20 à 25 % de l'ensemble des emballages plastiques et environ 70 à 90 % des textiles synthétiques consommés en Europe (Figures 1 à 3). Néanmoins, considérant les sujets de préoccupation sociétale de plus en plus importants que représentent les déchets plastiques, les émissions de gaz à effet de serre et la pollution par les microplastiques, les gouvernements européens ont mis en place des réglementations en vue de réduire les volumes de déchets et de promouvoir différentes approches de l'économie circulaire. Ces réglementations visent tout particulièrement les emballages et les textiles, car ceux-ci représentent une grande part des flux de déchets des villes et parce qu'il a été démontré que les textiles polyesters constituent une source du plus en plus importante de pollution primaire par les microplastiques²⁰.



Le PET/polyester représente environ 20 à 25 % de l'ensemble des emballages plastiques et environ 70 à 90 % des textiles synthétiques consommés en Europe.

Figure 1

Présentation des propriétés et applications du PET

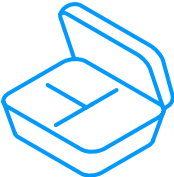
Noms	Symbole	Propriétés physiques	Applications
Polyéthylène téréphtalate (PET)		Léger Durable	 Bouteilles, si le matériau est moulé par injection-soufflage
Polyester (sous forme de fibre)		Bonne barrière pour le gaz Incolore Sans danger pour le contact avec les aliments	 Récipients, boîtes étanches et barquettes, si le matériau est thermoformé  Textiles, tissu croisé, cordes et fils, si le matériau est filé en fibre  Autres : feuilards et banderolages, films, etc.



Figure 2

Le PET est largement utilisé dans les emballages plastiques et les textiles synthétiques

- En Europe, le PET est utilisé presque exclusivement dans les emballages (4,8 Mt)² et les textiles (2,6 à 3,2 Mt)^{e,1,2} et dans ce dernier cas, il est appelé « polyester »
- Dans les applications liées à l'emballage, le PET est principalement utilisé pour la fabrication de bouteilles (3,3 Mt) ou de barquettes (1,0 Mt)²
- Le PET s'utilise également, à hauteur de 0,5 Mt, dans d'autres types d'emballages, y compris comme PET sous forme de film dans les emballages monocouches et multicouches et les feuillets et banderolages²

e Les données disponibles en particulier sur la consommation européenne de textiles synthétiques et de textiles polyesters (volumes mis sur le marché, y compris les importations) sont limitées. Les données présentées ici correspondent à une estimation fondée sur les meilleures sources disponibles.

Consommation d'emballages et de textiles en PET en Europe et décomposition par produit, 2020

Millions de tonnes

La consommation globale de PET en Europe est estimée à environ 7,4 à 8,0 Mt.

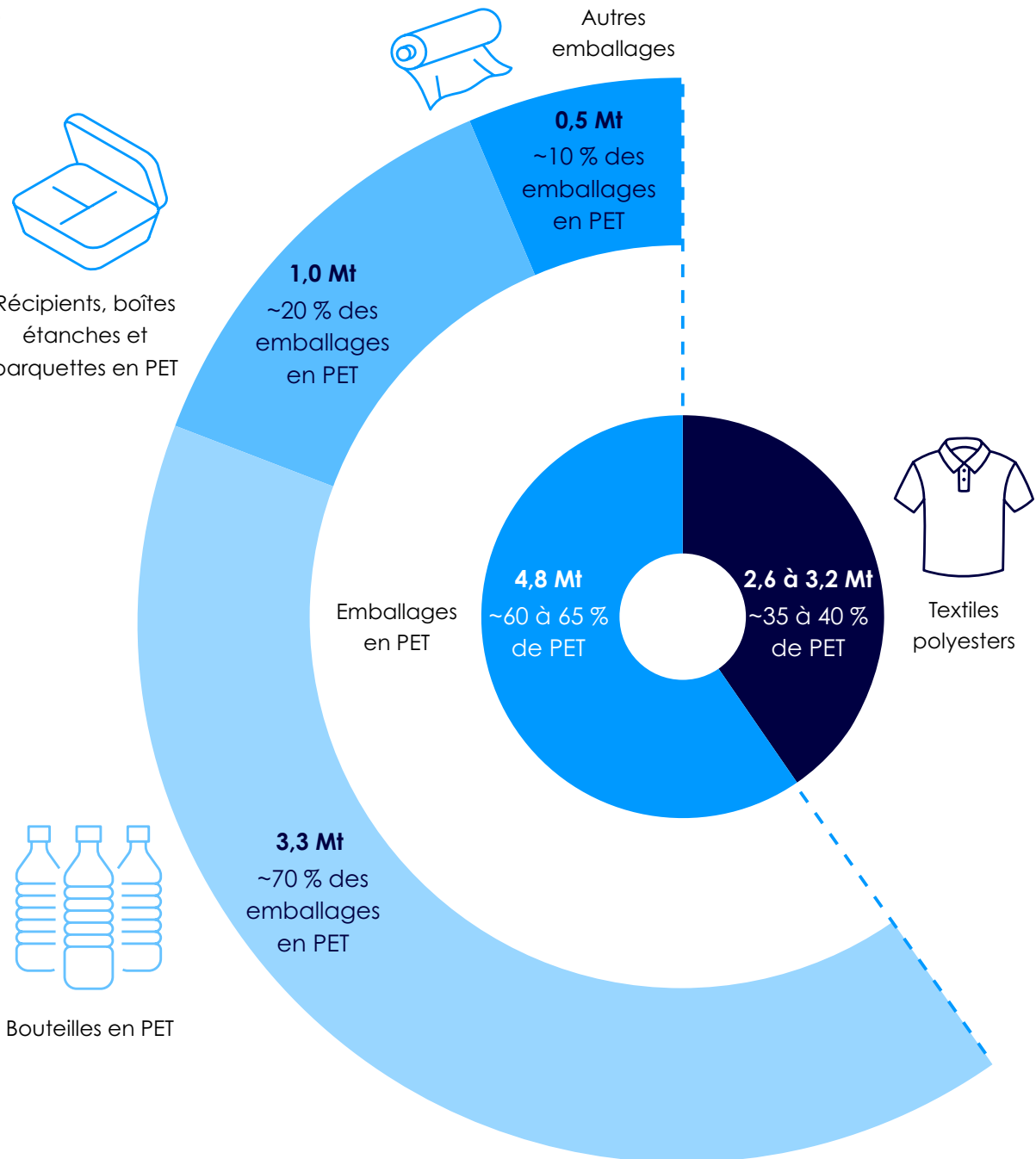


Figure 3

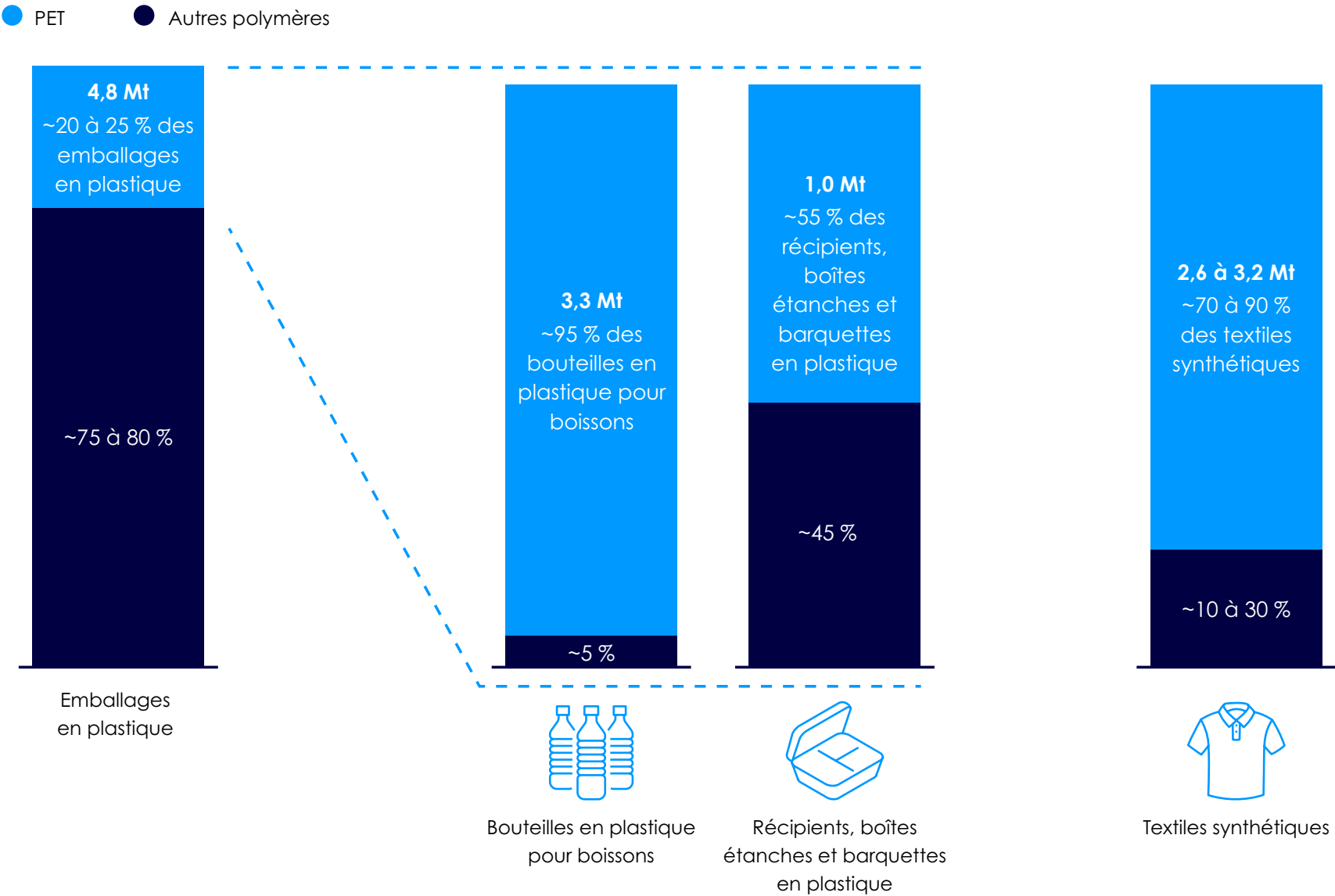
Le PET est le polymère primaire utilisé pour fabriquer les bouteilles en plastique, les barquettes et les textiles synthétiques.

- Le PET fait partie des principaux types de polymères plastiques utilisés en Europe, avec le polypropylène (PP) et le polyéthylène (PE)^{f,1,2}. L'élaboration d'une solution circulaire pour le PET/polyester constituerait en Europe une avancée importante vers une économie circulaire des emballages et des textiles.
- Le PET est le polymère primaire utilisé pour fabriquer les bouteilles en plastique pour boissons, les barquettes et les textiles synthétiques, marchés dont il représente approximativement 95 %, 55 % et 70 à 90 % des volumes^{2,3,21,22}. Étant largement utilisé pour les bouteilles et les barquettes, le PET représente un quart de l'ensemble du marché européen des emballages plastiques
- En plus du PET, le PP est aussi largement utilisé pour les barquettes²³, et le polyamide (également appelé nylon) s'utilise communément dans les textiles synthétiques²⁴

^f Les données disponibles étant limitées, cette figure combine les données sur la consommation d'emballages dans l'UE pour le PET et les données sur la demande de polymères provenant des transformateurs d'emballages de l'UE. Les transformateurs récupèrent des polymères et les transforment en produits finaux. En 2020, la demande de PET émanant des transformateurs (pour une utilisation quasi exclusivement dans des emballages) s'est élevée à 4,1 Mt, pour une consommation d'emballages en PET de 4,8 Mt. La différence peut s'expliquer par la balance des importations et des exportations d'emballages en PET et par la demande de PET recyclé.

Part du PET dans la consommation d'emballages plastiques et de textiles de l'Europe, 2020

Millions de tonnes



Un volume de 0,5 Mt d'emballages en PET correspondant aux « Autres » applications d'emballage n'est pas représenté.

1.2

Réduction, réutilisation, substitution et reconception

Il existe en Europe un certain nombre d'exemples de réduction, réutilisation, substitution et reconception de produits en PET/polyester (Figure 4). Globalement, en Europe, les impacts ont été significatifs mais n'ont pas freiné l'utilisation croissante du PET/polyester.

Ces approches de l'économie circulaire ont été stimulées à la fois par les actions volontaires des industriels, l'évolution des comportements des consommateurs et l'évolution des politiques gouvernementales.

Réduction

La réduction de l'utilisation du PET dans les bouteilles en plastique a été rendue possible par des innovations autour des modèles économiques (ex : système de gazéification SodaStream pour la maison permettant de remplacer les bouteilles à usage unique), efforts des industriels pour réduire l'utilisation (par la réduction de l'épaisseur des bouteilles) et actions des gouvernements pour réduire la consommation d'eau en bouteille (ex : mise en place de fontaines à eau publiques et campagnes axées sur les comportements des consommateurs pour renforcer l'adoption des bouteilles à usage multiple). Les efforts de réduction ont été moins visibles et moins heureux dans le secteur des vêtements et les niveaux de consommation généraux ont augmenté²⁵.

Réutilisation

En Europe, les taux de réutilisation des emballages en PET sont généralement très bas. Néanmoins, en Allemagne, des politiques menées par le gouvernement en coopération avec les industriels ont permis de mettre en place des systèmes de réutilisation des bouteilles en PET - les bouteilles réutilisées suivant cette approche représentent 15 % des bouteilles du segment de l'eau du pays⁴. Dans toute l'Europe, la réutilisation/revente de vêtements sur le marché des articles de seconde main est une activité portée par le marché, de même que l'exportation de vêtements de seconde main vers des marchés non européens. En moyenne, 38 % des textiles ménagers mis sur le marché sont collectés séparément, lorsque les consommateurs cessent de les porter. Au total, 55 % de ces matériaux collectés sont ensuite redistribués sous la forme de textiles pouvant à nouveau être portés⁵.

Substitution

Sur certains segments de marché, le passage du PET aux matériaux à base d'aluminium, de verre ou de fibre de papier, pour les contenants pour boissons et les barquettes, est déjà une réalité. Dans certains cas, toutefois, des inquiétudes ont été exprimées quant à la contribution réelle de ces substitutions de matériaux à la performance environnementale²⁶. Des études ont montré que, pour certaines applications, passer au PET peut permettre de réduire les émissions de GES ou, pour plusieurs alternatives non plastiques utilisées à l'échelle, d'augmenter la recyclabilité²⁷. Le passage des bouteilles en verre aux bouteilles en PET, par exemple, peut permettre de réduire les émissions globales de gaz à effet de serre, y compris dans la fabrication et le transport²⁷.

Reconception

Les efforts fournis volontairement et depuis longtemps par de nombreux industriels sur la conception orientée recyclage ont été stimulés par des plateformes collaboratives (European PET Bottle Platform, Petcore Europe, Global Commitment to a New Plastics Economy (Fondation Ellen MacArthur), etc.) et le Consumer Goods Forum (suppression progressive des matériaux problématiques et des additifs et passage des matériaux multicouches aux monomatériaux). De leur côté, les initiatives portant sur la conception des textiles (réduction des mélanges PET/nylon, etc.) ont pu s'appuyer sur des initiatives à but non lucratif, donc celles de la Fondation Ellen MacArthur et RISE.

Figure 4

Exemples de réduction, réutilisation, substitution et reconception du PET

Réduction		
Réseau de fontaines à eau de Venise ⁱ	• Installation d'un réseau de 126 fontaines • Lancement d'une carte des fontaines et d'une campagne facilitant l'accès aux fontaines • Limitation : difficultés à sensibiliser davantage et à faire évoluer les schémas de consommation à l'échelle	Mis en œuvre Italie
Réutilisation		
Soda Stream ⁱⁱ	• Fabricant de machines à eau pétillante pour la maison devant remplacer les achats de bouteilles de boissons gazeuses à usage unique	Mis à l'échelle International
Dispositif de bouteilles reremplissables ⁱⁱⁱ	• Dispositif de dépôt pour bouteilles en PET à remplir, dans le secteur de l'eau minérale • 15 % de part de marché² • Limitation : nécessite une collaboration avec les parties prenantes de toute la chaîne de valeur, et en particulier avec les détaillants et les distributeurs	Mis à l'échelle Allemagne
ReCircle ^{iv}	• Systèmes de contenants réutilisables pour les repas et boissons à emporter, dans des zones étendues • Mis en place en collaboration avec un réseau de partenaires vendeurs de plats et boissons à emporter	Mis en œuvre Suisse
Zero Waste Leeds ^v	• Carte interactive d'un réseau de bornes de collecte de textiles, boutiques caritatives, réparateurs, organismes de cours de couture et sites d'échange de vêtements • Vise à la réutilisation, à la réparation et au recyclage à valeur ajoutée des vêtements	Mis en œuvre Royaume-Uni
Substitution		
Barquettes à base de fibres pour plats préparés Waitrose ^{vi}	• Cette enseigne de supermarchés lance une gamme de plats préparés vendus en barquettes à base de fibres • Le but est de proposer une alternative plus durable aux barquettes noires en PET • Limitation : cette mesure ne devrait être mise en place que lorsqu'il est prouvé que les impacts environnementaux (GES) sont bénéfiques par rapport à l'alternative PET	Mis en œuvre Royaume-Uni
Reconception		
Bouteilles de Sprite transparentes ^{vii}	• Coca Cola a substitué à la bouteille originale verte (commercialisée avec cette couleur depuis 1961) une bouteille en PET transparente • Une fois recyclées mécaniquement, les bouteilles de couleur trouvent moins d'applications futures que les bouteilles transparentes	Mis à l'échelle Europe

Sources : (i) venicetapwater.com; (ii) Soda Stream, <https://sodastream.com/blogs/explore/fight-plastic> (iii) Eunomia (2022) PET Market Europe ; State of Play ; (iv) recircle.ch ; (v) zerowasteleeds.org.uk (vi) <https://www.foodpackagingforum.org/news/fiber-tray-to-replace-black-plastic>; (vii) <https://www.cocacolaep.com/fj/news-and-insight/same-sprite-new-clear-bottle/>.

Rapport « ReShaping Plastics » p42 <https://www.systemiq.earth/wp-content/uploads/2022/05/ReShapingPlastics-v2.1.pdf>.

Étude « Critical raw materials » p17 https://www.systemiq.earth/wp-content/uploads/2022/11/Systemiq-2022.-Circular-Economy- CRM-Resilience-Summary-Presentation_final.pdf.

1.3

Recyclage

En Europe, les taux de recyclage du PET/ polyester varient beaucoup en fonction de l'application des produits et des réglementations et systèmes locaux.

Avec des taux de recyclage moyens de 50 à 55 %, les bouteilles en PET transparentes pour boissons sont davantage recyclées que les produits en PET destinés à d'autres applications. Ces taux s'expliquent par un haut niveau de collecte et de tri des bouteilles en PET transparentes, qui représentent 72 % des bouteilles en PET triées en Europe⁴ et qui conviennent à la production de matériaux d'emballage transparents (les volumes restants étant des bouteilles de couleur (27 %) ⁴ et des bouteilles opaques (1 %) ⁴, lesquelles ne conviennent qu'aux applications du PET recyclé aux couleurs plus sombres, de moindre qualité et de plus faible valeur²). Les taux de recyclage varient beaucoup, leur niveau dépendant principalement de l'existence et de la qualité des dispositifs de consigne des bouteilles^{4,8}. Les taux de recyclage sont nettement plus faibles pour les barquettes et les textiles en PET (Figure 5).

Dans toute l'Europe, les trois quarts de tout le PET/ polyester ne sont pas recyclés et sont mis à la décharge, incinérés avec récupération d'énergie ou abandonnés après usage. En 2020, seulement 17 % des bouteilles (en masse) étaient recyclées en de nouvelles bouteilles, la plupart des bouteilles étant recyclées en textiles et barquettes (Figures 6 et 7).

Les données sur les taux de recyclage pour les barquettes et les textiles sont limitées, mais ces taux se situent a priori nettement au-dessous des taux de barquettes et de textiles réellement disponibles pour le recyclage (respectivement 20 et 10 %). Le recyclage du polyester comprend les applications de recyclage en boucle ouverte, telles que les matériaux d'isolation ou de garniture de matelas, et seulement une petite part du polyester - probablement moins de 1 % – est recyclée en nouveaux textiles^{5,28,29}.

Les emballages en PET font l'objet de politiques concertées visant à favoriser concrètement l'augmentation des taux de recyclage, et les engagements volontaires de la part des marques grand public (mode et boissons) à utiliser davantage le PET recyclé dans leurs textiles et leurs emballages. La réalisation de ces objectifs et la satisfaction de la demande des industriels nécessiteront une rapide mise à l'échelle de l'offre de PET recyclé de haute qualité (Figure 7).

Parallèlement, les politiques européennes évoluent rapidement afin d'encourager les approches de l'économie circulaire pour les emballages et les textiles en plastique. Cette évolution devrait accroître la pression déjà exercée pour la mise à l'échelle de la réutilisation et du recyclage du PET/polyester, et devrait conduire à des mesures d'accompagnement, telles que les exigences d'écoconception, de collecte séparée des emballages et des textiles et le

financement à partir de dispositifs en matière de responsabilité élargie du fabricant (Figure 8).

Augmenter les taux de recyclage du PET/polyester afin de répondre à la demande n'est cependant pas simple. Le recyclage mécanique se heurte à des limitations du point de vue de la qualité des produits^{30,31}.

Les problématiques du recyclage mécanique sont les suivantes :

- 1. Capacité à mélanger des polymères de qualité et de types différents provenant de produits d'applications différentes ou se présentant dans des formats aux matériaux multiples
- 2. Dégradation des chaînes polymères pendant le processus de recyclage
- 3. Contamination par d'autres produits (ex : huiles)

Le PET est particulièrement intéressant dans la mesure où il permet, certes pour un coût supplémentaire, de surmonter plus facilement certaines de ces problématiques liées au recyclage mécanique que ne le permettent par exemple les polyoléfines. Le développement, par exemple, des systèmes de collecte de bouteilles dédiés (ex : systèmes de consigne), combiné avec des qualités de bouteilles en PET uniformes, contribue à réduire la perte de propriétés physiques, et il existe pour le PET recyclé (rPET) mécaniquement des traitements post-recyclage (post-condensation à l'état solide) qui facilitent le rétablissement des propriétés physiques du matériau.

Dans toute l'Europe, les trois quarts de l'ensemble du PET/ polyester ne sont pas recyclés.

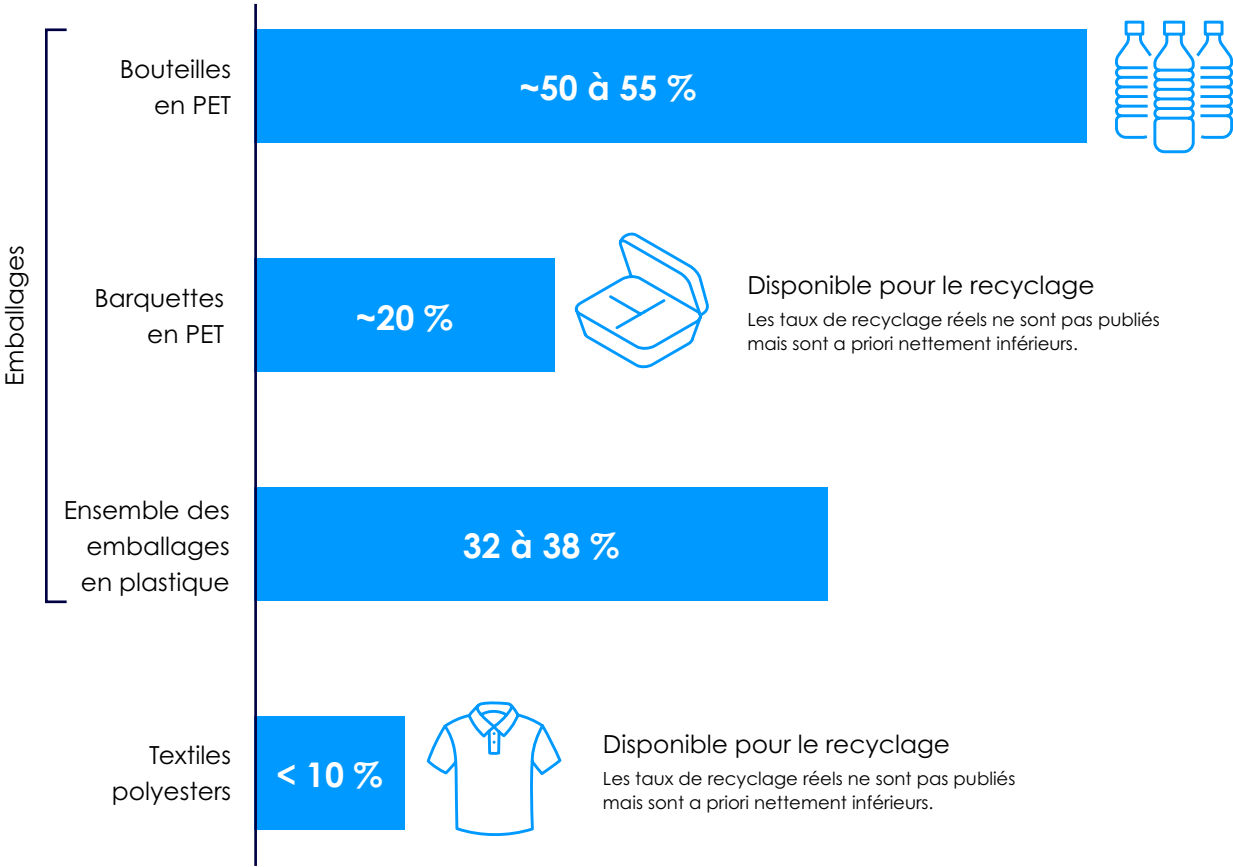
Dans chaque boucle de recyclage, les deux tiers de l'ensemble du PET/ polyester recyclé sont transformés pour passer d'une application pour produits sensibles (bouteilles pour boissons) à une application autre que pour produits sensibles, avec une faible probabilité d'être à nouveau recyclés.

Figure 5

Les taux de recyclage des bouteilles en PET sont comparativement élevés, et pourtant les barquettes et les textiles arrivent loin derrière

- En 2020 en Europe, comparé à la masse globale des produits mis sur le marché, le taux moyen de recyclage de l'ensemble des déchets plastiques post-industriels était de 32 à 38 %^{6,7}, pour une plage de 10 à 57 % sur l'ensemble des pays considérés⁶
- Pour les bouteilles en PET en particulier, le taux de recyclage est de 50 à 55 % ; pour les barquettes, il est inférieur à 20 %⁴. Pour les textiles polyesters, et même si les données ne sont pas facilement accessibles, les taux de recyclage sont estimés à moins de 10 %
- Les taux de recyclage plus élevés des bouteilles en PET s'expliquent par de nombreux facteurs, dont la collecte et le tri des bouteilles pour le recyclage, très répandus, et l'adoption de systèmes de consigne dans certains pays européens, tels que la Norvège et l'Allemagne.⁹ Dans l'ensemble de l'Europe, les taux de collecte des bouteilles en PET pour recyclage sont variables, certains pays tels que l'Allemagne, la Finlande et la Lituanie déclarant des taux supérieurs à 90 %, et d'autres tels que la Bulgarie, la Grèce, le Portugal et l'Espagne affichant des taux inférieurs à 40 %⁴
- Le marché du recyclage des barquettes en PET est en train d'évoluer. La faible performance actuelle du recyclage mécanique des barquettes en PET par rapport aux bouteilles en PET est due à plusieurs facteurs :
 - Les systèmes de collecte séparés, pour les barquettes, ne sont pas largement répandus⁴
 - Il n'y a pas suffisamment d'installations de tri à part entière qui soient capables de séparer les barquettes en PET des autres formats de déchets d'emballage⁴
 - La présence de produits multimatériaux, de matériaux multicouches, de colles et de films conduit à la contamination (en particulier les éléments légers, tels que les films d'opercule)^{4,32}
 - La fragilité du PET utilisé dans la fabrication des barquettes se traduit en production par la génération de davantage de particules fines et peut avoir une incidence sur la qualité et le rendement du PET recyclé, y compris quand les barquettes sont recyclées avec des bouteilles⁴

Taux de recyclage moyens pour l'Europe, 2020



Notes : les données se rapportent aux volumes recyclés mécaniquement. Le taux de 50 % indiqué ici pour le taux de recyclage des bouteilles pour boissons correspond à un taux calculé sur la base de la production de PET recyclé en proportion par rapport à la masse globale des bouteilles mises sur le marché, en incluant la masse d'éléments non en PET, tels que les bouchons, les couvercles et les étiquettes. Mais si l'on tient compte de ces éléments non en PET, le taux de recyclage du PET n'est que de 55 %.

Il n'y a pas de données disponibles pour les taux de recyclage des barquettes en PET et du polyester. Il est néanmoins largement admis que les taux de recyclage sont très faibles, et nettement inférieurs aux taux de collecte, qui sont indiqués sur le graphique.

Il n'y a pas de données disponibles pour les taux de recyclage du polyester. D'après les données disponibles, 32 %⁵ des volumes de déchets issus de vêtements et de textiles ménagers sont orientés vers des flux séparés. Sur cette proportion, 26 à 30 %^{5,28} sont destinés au recyclage (ces estimations tiennent compte du recyclage à perte de valeur des déchets textiles en applications telles que l'isolation ou les garnitures pour matelas), ce qui donne au total un taux de recyclage d'environ 8 à 10 %. D'autres produits en polyester sont supposés avoir des taux de recyclages plus faibles. Les chiffres ne tiennent pas compte de la revente ni de la réutilisation des textiles pouvant être portés.

D'après les calculs d'Eurostat, le taux de recyclage des emballages plastiques de l'Europe serait de 38 %⁶, contre 32 % d'après PlasticsEurope (The Circular Economy for Plastics, 2022, PlasticsEurope). Ces deux chiffres ont été calculés suivant les nouvelles règles de calcul (volumes d'intrants dans les installations de recyclage, sans compter les étapes de préparation telles que le tri, le déchetage et le lavage, comme l'imposent les nouveaux règlements (UE) 2019/665 et 2019/1004). Des rapports ultérieurs estiment qu'en 2020 en Europe le taux de recyclage était nettement inférieur (15 à 17 %), arguant du fait que la génération de déchets plastiques est plus importante que ne le déclarent les pays (taux publié par Eurostat). Sources : (1) Systemiq, Reshaping Plastics, (2) PET Market: State of Play 2022, Eunomia (2022), (3) Eurostat, (4) Sorting for Circularity, Circle Economy & Fashion for Good, (5) Demand, Consumption, Reuse and Recycling of Clothing and Textiles in Germany, Federal Association for Secondary Raw Materials and Waste Management (2020), (6) Eunomia & Zero Waste Europe, How Circular is PET?

Figure 6 (voir page suivante)

Une carte des flux de PET/polyester pour l'Europe atteste d'une faible circularité et d'une dépendance aux bouteilles en PET comme matière première de recyclage

- En 2020, le taux de recyclage global du PET/polyester était d'environ 25 %, 75 % du PET/polyester étant mis à la décharge, incinérés ou abandonnés
- Le PET recyclé est utilisé dans de nombreux produits. Sur l'ensemble des bouteilles recyclées, 30 % sont recyclées en de nouvelles bouteilles, le volume restant servant à la fabrication de barquettes (31 %), d'autres emballages (13 %) et de textiles (26 %)²
- Les principales problématiques du système existant sont les suivantes :
 - La technologie de recyclage mécanique ne permet pas de recycler tous les produits en PET autres que les bouteilles
 - Les dispositifs de collecte dédiés sont trop peu nombreux (ex : textiles)
 - Les systèmes de collecte ne sont pas harmonisés (ex : pour les bouteilles)
 - Les processus de tri sont trop peu nombreux (ex : pour les barquettes et les textiles)²
 - Les processus de tri et de recyclage engendrent des pertes
 - La qualité de la matière première n'est pas constante (ex : contaminants provenant des aliments et d'autres polymères)
 - La conception orientée recyclage est insuffisante

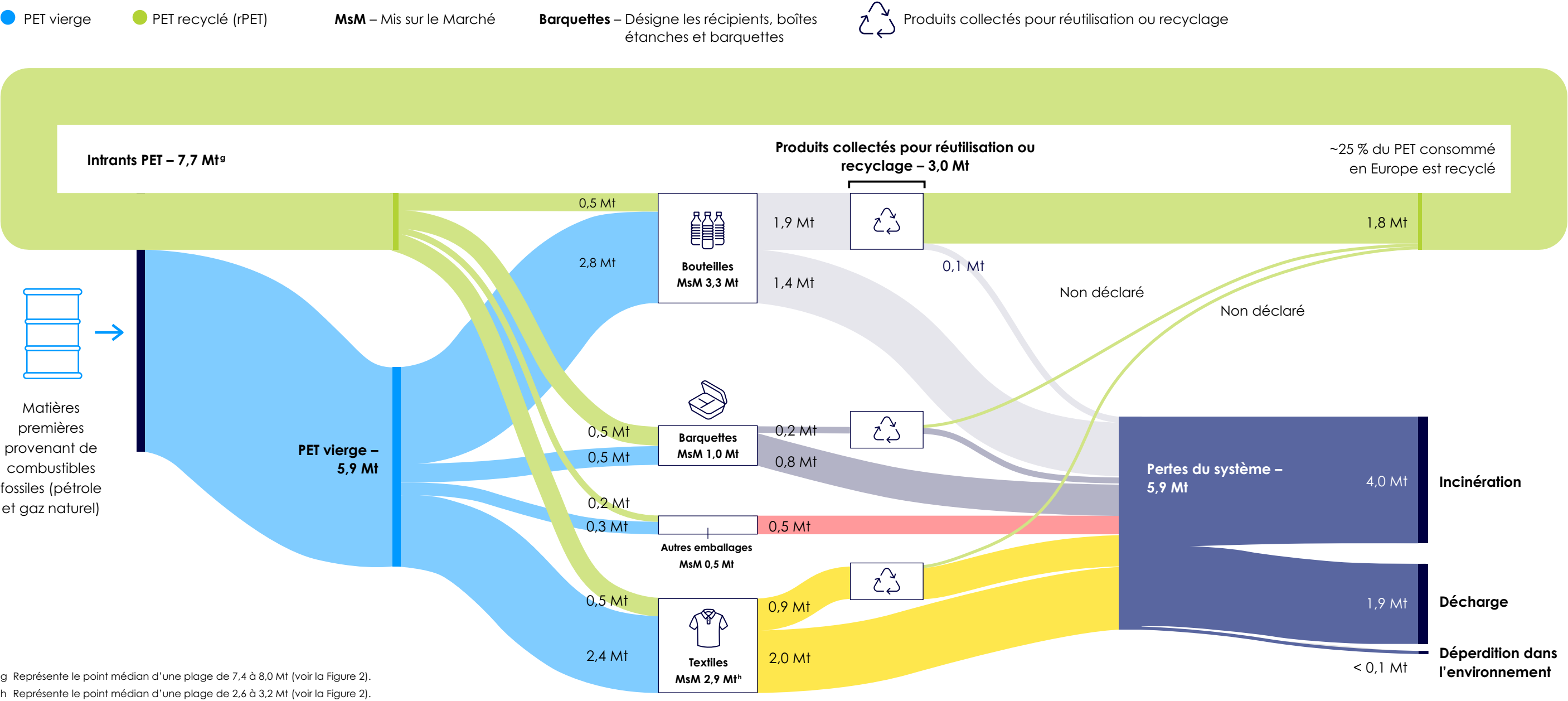
Notes : le bioPET n'est pas représenté car son volume est trop faible. D'après les données sur le marché des bioplastiques, la production mondiale de bioPET en 2021 a été de 0,15 Mt - European Bioplastics (2021). Ce graphique ne représente pas le flux de PET/polyester qui existe hors des frontières géographiques de l'Europe et ne donne pas une estimation quantifiée de la contribution des barquettes ou des textiles à l'offre de PET recyclé, en raison du manque de données sur ces sujets. Comme illustré aux pages précédentes, il existe en Europe des systèmes de réutilisation de certains produits (ex : textiles et bouteilles d'eau en PET en Allemagne), mais par souci de simplification cette réutilisation n'est pas représentée sur le schéma des flux de matériaux.

Figure créée par adaptation de données issues des sources suivantes : How circular is PET?, Eunomia et Zero Waste Europe (2022), PET Market: State of Play 2022, Eunomia (2022), et Plastic in textiles: towards a circular economy for synthetic textiles in Europe – Agence européenne pour l'environnement (2021) et Environmental and Socioeconomic Impacts of Polyethylene terephthalate (PET) Packaging Management Strategies in the EU, A. Bassi et autres (2022) ; Note : là où cela était possible, ce schéma exclut la masse des éléments non en PET, tels que les bouchons de bouteilles, les couvercles et les étiquettes.



Flux de PET en Europe, 2020

Millions de tonnes



^g Représente le point médian d'une plage de 7,4 à 8,0 Mt (voir la Figure 2).
^h Représente le point médian d'une plage de 2,6 à 3,2 Mt (voir la Figure 2).

Figure 7

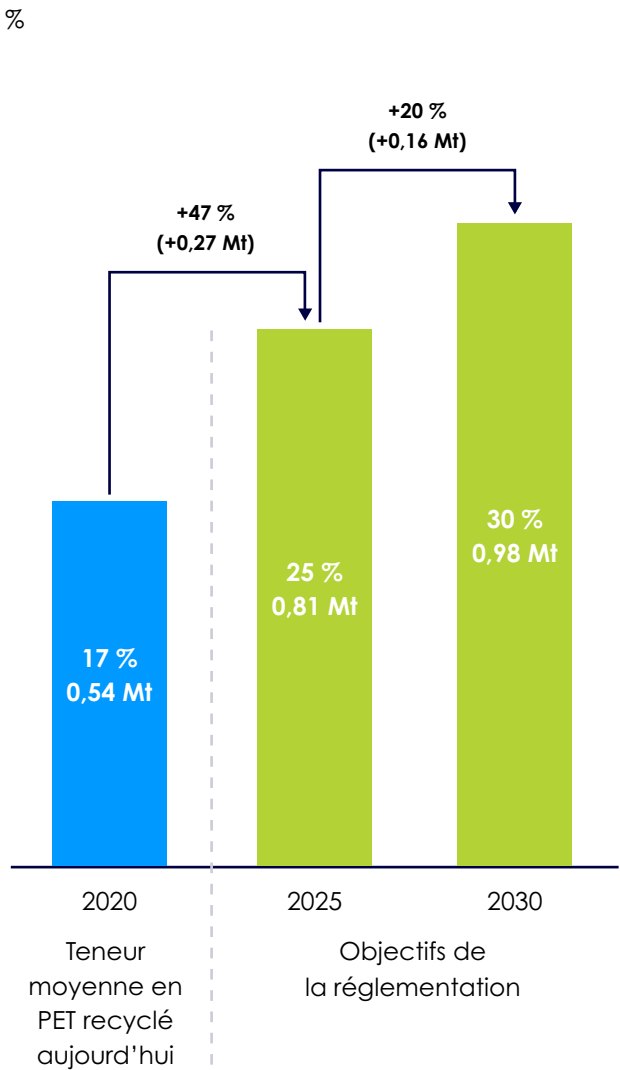
La demande de PET recyclé de haute qualité pour produits sensibles va continuer à augmenter

Les facteurs qui vont stimuler la demande :

- Les évolutions des politiques de l'UE : la directive SUP (plastiques à usage unique) fixe la teneur moyenne en matériau recyclé des bouteilles en PET pour boissons à 25 % pour 2025 et 30 % pour 2030. Cela implique une augmentation particulièrement forte de la demande à court terme, d'au moins 50 % environ à partir de la période 2020-2025¹⁰, objectif qui au vu de la croissance historique du secteur sera difficile à atteindre²¹
- Les engagements volontaires des industriels à augmenter davantage la teneur de leurs produits (emballages et textiles) en PET recyclé - ex : engagements pris par les signataires du « Global Commitment to a New Plastics Economy » piloté par la Fondation Ellen MacArthur²

Notes : les marques indiquées sur la figure correspondent à des entreprises chez lesquelles la part du PET dans l'ensemble de leurs matériaux d'emballage est importante.

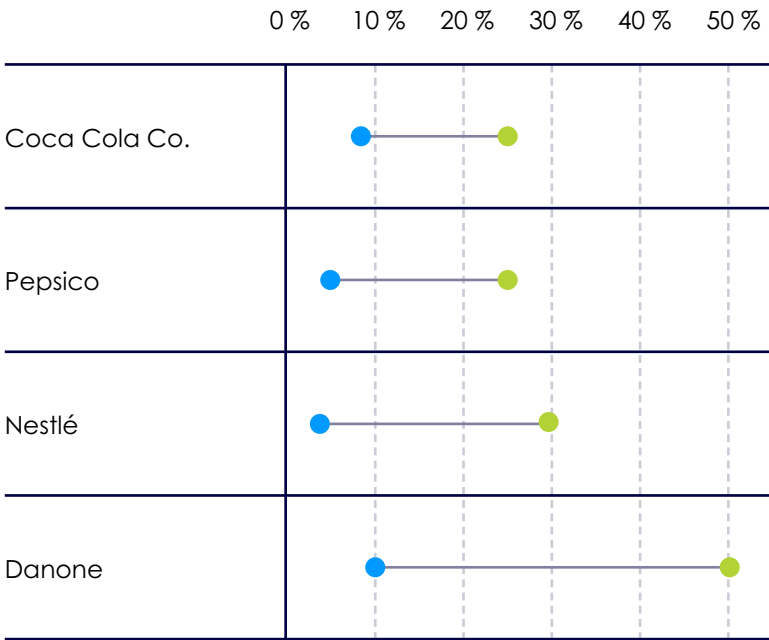
Teneur en PET recyclé des bouteilles pour boissons – Directive SUP (plastiques à usage unique)¹



Engagements des marques mondiales sur la teneur en PET recyclé des emballages²

Teneur en PET recyclé en 2020 Objectif pour 2025

Exemples d'entreprises



Les engagements de The Coca-Cola Company, PepsiCo et Nestlé s'appliquent à l'ensemble des emballages en plastique.
L'engagement de Danone s'applique à l'ensemble des bouteilles pour boissons.

Figure 8

Les politiques européennes évoluent rapidement afin d’encourager les approches de l’économie circulaire pour les emballages et les textiles en plastique.

Politiques de la Commission européenne	Calendrier des prochaines étapes de révision ou de mise en œuvre (estimations ou attentes)	Importance potentielle de la politique pour la circularité du PET/polyester
Stratégie de l’UE pour des textiles circulaires et durables	Publiée en mars 2022	Document de stratégie comprenant des propositions de mesures visant à augmenter les taux de réutilisation et de recyclage pour les textiles
Communication de l’UE pour faire des produits durables la norme	Publiée en mars 2022	Passeports numériques des produits (DDP) fondés sur les exigences réglementaires d’informations sur la circularité et d’autres aspects environnementaux majeurs, y compris pour les textiles et les emballages
Règlement relatif aux matériaux et objets en matière plastique recyclée destinés à entrer en contact avec des denrées alimentaires	Adopté en septembre 2022	Règlement fixant des exigences pour les procédés de recyclage des matériaux plastiques dont les extrants sont destinés à entrer en contact avec des denrées alimentaires Ce règlement inclut le PET en tant que matériau, et les exigences applicables aux procédés de recyclage du PET sont précisées séparément
Directive sur les plastiques à usage unique (SUPD)	A pris effet en juillet 2021	Les bouteilles en PET pour boissons sont identifiées spécifiquement pour les objectifs de teneur minimum en contenu recyclé pour les bouteilles pour boissons (25 % d’ici 2025 et 30 % d’ici 2030)
Règlement d’exécution de la Directive sur les plastiques à usage unique (SUPD)	Adoption prévue pour le 1 ^{er} trimestre 2023	Règlement d’exécution devant donner des orientations techniques supplémentaires pour les objectifs fixés dans la SUPD
Règlement sur les emballages et déchets d’emballages (PPWR)	Projet de législation publié en novembre 2022 Adoption attendue pour mi-2023	- Objectifs de réutilisation pour les bouteilles pour boissons et les emballages en général - Objectifs de conception orientée recyclage pour les bouteilles pour boissons et les emballages en général - Utilisation accrue des dispositifs de consigne pour les bouteilles pour boissons dans toute l’Europe - Contenus recyclés pour les bouteilles pour boissons et les emballages pour produits sensibles en général - Indication de la reconnaissance du recyclage chimique comme procédé contribuant à la réalisation des objectifs de recyclage et des objectifs en matière de contenus recyclés
Révision de la Directive cadre sur les déchets (WFD)	Projet de législation attendu pour le 2 ^{ème} trimestre 2023	Règles européennes harmonisées en matière de responsabilité élargie du fabricant, et incitations économiques visant à encourager la conception orientée recyclage (« écomodulation des contributions »)
Règlement sur l’écoconception des produits durables	Projet de législation publié en mars 2022 Adoption attendue pour mi-2023	- Minima obligatoires pour l’insertion de fibres recyclées dans les textiles pour les rendre plus durables et plus faciles à réparer et recycler - Interdiction de la destruction des produits invendus, sous certaines conditions, y compris pour les textiles invendus ou rendus
Révision de la Directive sur le transport des déchets	Projet de législation publié en novembre 2021 Adoption attendue pour le 2 ^{ème} trimestre de 2023	- Autorise l’exportation des déchets plastiques hors des pays de l’OCDE uniquement sous certaines conditions - Développement de critères spécifiques à l’UE pour classer correctement les déchets et augmenter la transparence et la durabilité dans le commerce international des déchets textiles et des textiles usagés

Nouvelles évolutions

pour le recyclage du PET/polyester

Le potentiel que représentent les technologies de recyclage chimique pour augmenter les taux de recyclage du plastique en Europe, parallèlement au recyclage mécanique et à la réutilisation, suscite un intérêt croissant.

Le recyclage chimique comprend trois ou quatre ensembles de technologies (Figure 10), lesquelles présentent des différences importantes : (1) dépolymérisation, (2) pyrolyse, (3) gazéification et (4) recyclage à base de solvant, qui est parfois classé parmi les différents types de recyclage chimique^{i,33,34}.

Comme indiqué précédemment, par sa composition chimique, le PET/polyester convient particulièrement à un type de recyclage chimique appelé la « dépolymérisation ». La dépolymérisation inclut les technologies de la méthanolyse, la glycolyse et l'hydrolyse qui consistent à décomposer les déchets en PET/polyesters pour revenir à leurs précurseurs

chimiques, appelés monomères. Les monomères sont repolymérisés pour redevenir des plastiques recyclés pour produits sensibles (c'est-à-dire de « qualité alimentaire ») possédant les mêmes propriétés fonctionnelles que le plastique vierge^l (Figure 9). La dépolymérisation convient aux matières premières PET/polyesters dont les taux de recyclage sont actuellement plus faibles, y compris les bouteilles de couleur, les barquettes, les textiles à forte teneur en polyester et les déchets PET issus du procédé de recyclage mécanique (Figure 11).

Le recyclage chimique des plastiques constitue en Europe un sujet majeur. Les parties prenantes s'inquiètent de ses incidences négatives sur l'environnement (en particulier des émissions de GES), de la concurrence avec le recyclage mécanique et de la viabilité des méthodologies de bilan de matière pour le mélange à la fois de matières premières vierges et de matières recyclées. Ces débats ont porté principalement sur les technologies de conversion thermique, telles que la pyrolyse, qu'on applique généralement aux plastiques polyéthylènes ou polypropylènes et qui ne conviennent pas pour

le PET/polyester. La dépolymérisation du PET/polyester est généralement considérée comme moins énergivore que la pyrolyse. Contrairement à la pyrolyse, la dépolymérisation du PET/polyester ne nécessite pas obligatoirement un bilan de matière, car elle peut produire un seul et même ensemble d'extrants chimiques pouvant ensuite être utilisés et suivis sans mélangeage ultérieur avec d'autres substances dans les étapes suivantes de la polymérisation. Même si c'est au cas par cas, et en fonction de la logistique et des infrastructures existantes (ex : taille et interconnexion avec d'autres processus), la technologie du bilan de matière peut être privilégiée^k.

Le recyclage chimique du PET/polyester est aujourd'hui en Europe une technologie à petite échelle ; néanmoins, la construction d'installations à une échelle industrielle a été annoncée (Figure 13) et des solutions de recyclage chimique sont par ailleurs au cœur de certains projets, annoncés récemment, portant sur des collaborations au sein de la chaîne de valeur européenne pour le recyclage de textile-à-textile^l.

i Le recyclage à base de solvant ne modifie pas la structure chimique du polymère lui-même. C'est pourquoi certains font valoir qu'il devrait être considéré comme du recyclage mécanique, plutôt que chimique. Le rapport de la Commission européenne de 2019 s'appuie dans ses termes sur la logique voulant que, des produits chimiques étant utilisés dans la purification à base de solvant pour modifier la formulation du plastique, ce type de recyclage peut être qualifié de chimique.

j La légalité de l'utilisation des plastiques issus du recyclage chimique pour des applications sensibles dépend de l'application exacte qui est faite de la technologie et peut ne pas valoir pour tous les types de dépolymérisation du PET. En Europe, cette question est soumise au Règlement (UE) 10/2011 et au Règlement (UE) 2022/1616 de la Commission européenne qui indique que la fabrication des matériaux et articles en plastique avec des substances obtenues à un haut niveau de pureté à partir de déchets et qui figurent dans la liste de l'UE établie par le Règlement (UE) 10/2011, ou qui font l'objet de certaines dérogations, devrait être soumise à ce Règlement et être exclue du champ d'application du Règlement (UE) 2022/1616. A contrario, d'autres substances dont on ne peut pas supposer a priori qu'elles sont exemptes de contaminants indirects, dont les mélanges, oligomères et polymères produits à partir de déchets, ou qu'il est facile de les débarrasser de ces contaminants indirects si elles en contiennent, devraient être soumises au Règlement (UE) 2022/1616. Il est précisé que toutes ces technologies peuvent être utilisées pour produire des précurseurs chimiques, appelés monomères. Certains fournisseurs de technologies peuvent décider d'utiliser ces technologies pour produire des oligomères. Néanmoins, dans ce cas, le mélange produit peut ne pas être conforme aux règles de sécurité alimentaire mentionnées plus haut et la présence d'oligomères peut les exclure du champ d'application du Règlement (UE) 2022/1616.

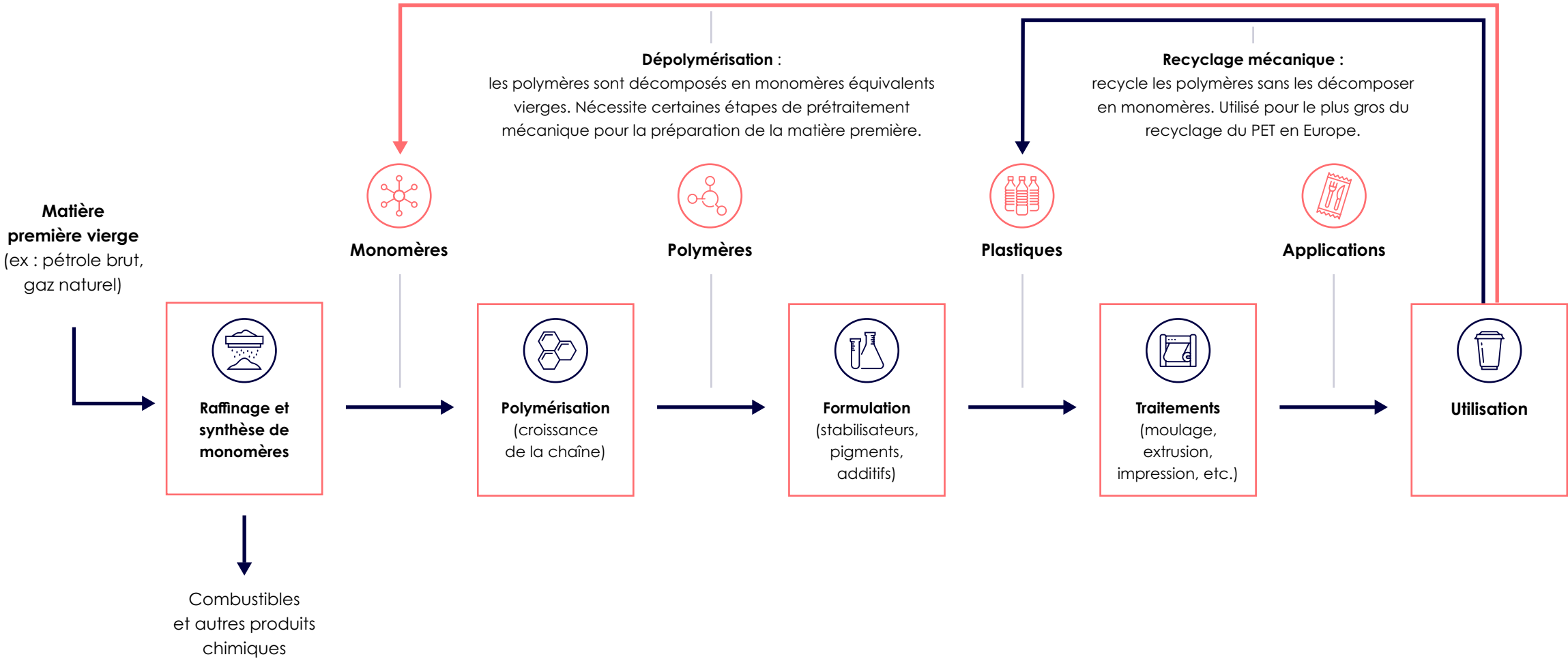
k Par opposition, le recyclage chimique par pyrolyse repose sur le principe dit de *mass balance* (bilan de matière), car les installations de craquage utilisées pour la fabrication des plastiques polyéthylènes ou polypropylènes sont trop grandes pour utiliser exclusivement de la matière première recyclée et ont une production multiple comprenant notamment des combustibles et des précurseurs chimiques ne pouvant pas servir à la production de plastiques.

l Exemples : l'initiative de recyclage du polyester Fashion For Good implique CuRe Technology, Garbo, gr3n et PerPETual ; l'initiative de recyclage du textile T-Rex implique Infinited Fiber Company, BASF et CuRe Technology, et le projet de recyclage du textile Whitecycle monté par Michelin implique Carbios.

Figure 9

Présentation des processus de production et de recyclage du PET montrant les parcours du recyclage mécanique et du recyclage par dépolymérisation

Les taux de recyclage du PET actuels sont obtenus à travers le recyclage mécanique. Mais le PET peut aussi être recyclé suivant des méthodes moléculaires, telles que la dépolymérisation.



Notes : la dépolymérisation et le recyclage mécanique nécessitant tous deux des étapes de prétraitement, les mesures favorisant la conception orientée recyclage leur seront profitables. Figure adaptée des travaux de De Smet, M. & Linder, M. (Eds.): A circular economy for plastics – Insights from research and innovation to inform policy and funding decisions, Commission européenne, Bruxelles, Belgique (2019).

Figure 10

Il existe trois types de dépolymérisation du PET

Le « recyclage chimique » regroupe une série de technologies, dont toutes ne peuvent pas s'appliquer au PET, et qui présentent des différences importantes

● La pyrolyse ne peut pas s'appliquer au PET/polyester

Méthode de recyclage

Sous-types + descriptions

Exemples de spécialistes européens

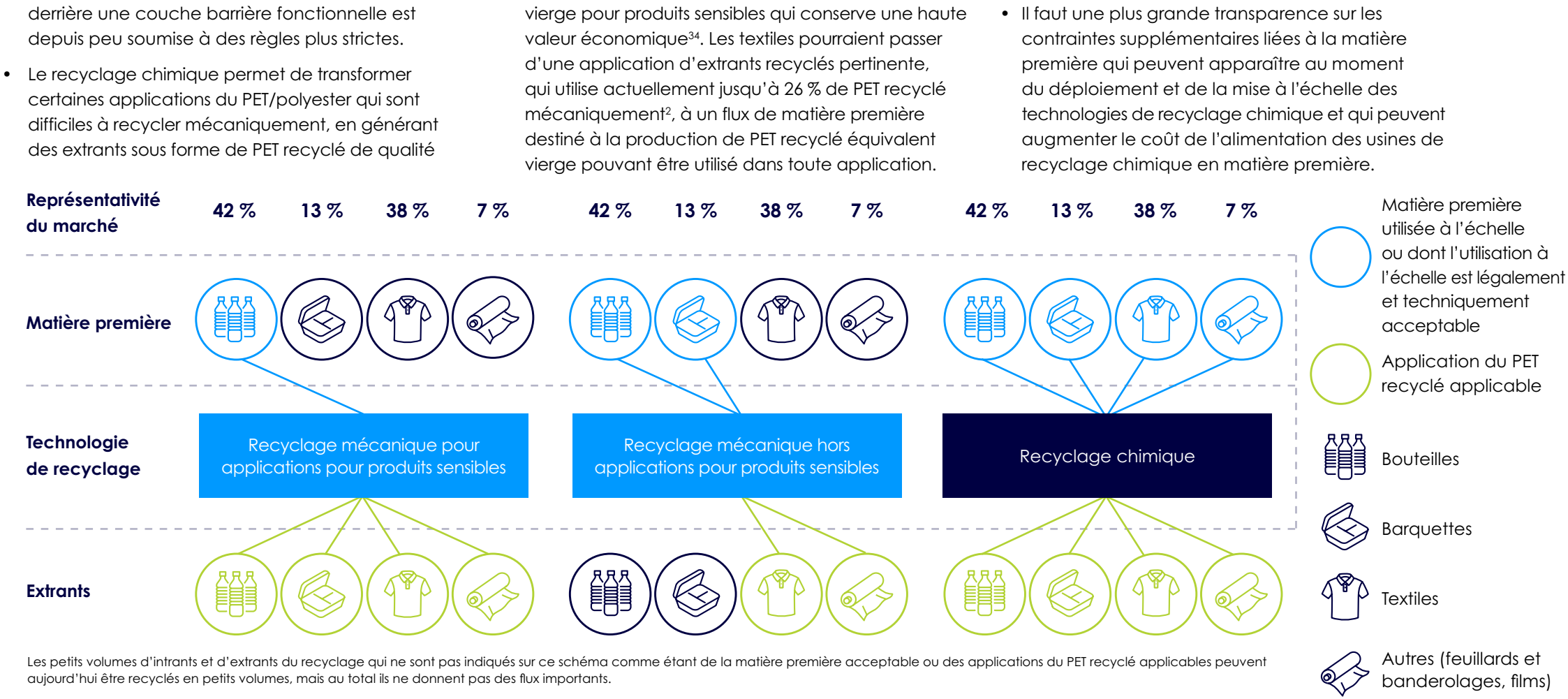
Méthode de recyclage	Mécanique	Recyclage chimique				
	Les technologies de recyclage consistent à remouler les plastiques en plastiques pour de nouvelles applications sans altérer leur composition chimique	Dépolymérisation			Conversion thermique	
		Les technologies de recyclage consistent à décomposer les polymères plastiques en molécules plus petites (monomères ou oligomères) qui sont ensuite reconstituées en plastiques possédant les mêmes propriétés que les plastiques neufs			Les technologies de recyclage consistent à décomposer la chaîne polymère en hydrocarbures pouvant ensuite être utilisés dans les chaînes d'approvisionnement de plastique-à-plastique (ex : naphte, méthanol)	
Sous-types + descriptions		Méthanolyse	Hydrolyse	Glycolyse	Pyrolyse ¹ (pas pour le PET)	Gazéification
		Technologie de renouvellement du polyester utilisant le méthanol comme réactif pour décomposer le PET	Technologie de renouvellement du polyester utilisant l'eau comme réactif pour décomposer le PET	Technologie de renouvellement du polyester utilisant l'éthylène glycol comme réactif pour décomposer le PET	Décomposition du polymère par réchauffage sous atmosphère inerte	Décomposition du polymère par réchauffage à la vapeur/à l'air
Exemples de spécialistes européens						
	Faerch Indorama	Eastman Loop Industries	Carbios Gr3n	Axens Ioniqa	Plastic Energy Mura Technology	Enerkem

Note : les acteurs énumérés comme exemples peuvent avoir des installations hors de l'UE et prévoient d'augmenter leur capacité dans l'UE dans un avenir proche.

Figure 11

Le recyclage chimique permet de transformer certains produits difficiles à recycler en PET équivalent vierge adapté aux applications pour produits sensibles

- Les bouteilles transparentes et bleu clair peuvent être recyclées mécaniquement en produits en PET de couleur similaire^m. La production de PET recyclé adapté aux applications pour produits sensibles à partir du recyclage mécanique de bouteilles pour boissons est autorisée par l'Autorité européenne de sécurité des aliments (EFSA) si les autres intrants de qualité non alimentaire du processus de recyclage contenus dans la matière première ne dépassent pas 5 %ⁿ.
- Le PET de plusieurs couleurs ne peut pas être recyclé en applications aux couleurs plus claires, mais peut trouver de nouvelles applications dans les mêmes couleurs ou dans des couleurs plus sombres⁴.
- Les barquettes en PET peuvent être recyclées en nouvelles barquettes en PET. Plusieurs barrières limitent toutefois cette possibilité : (i) la fragilité du PET utilisé dans la fabrication des barquettes se traduit en production par la génération de nombreuses particules fines et limite le rendement et la transformabilité ; (ii) la matière première est limitée, car le nombre d'installations de collecte et de tri existantes est limité⁴ ; (iii) l'utilisation du PET recyclé à partir de barquettes pour des applications pour produits sensibles nécessite l'autorisation de l'EFSA, et l'utilisation du PET recyclé non approuvé



Note : figure adaptée de Closed Loop Partners « Transition to a Circular System for Plastics » aux applications du PET.

m En raison de la grande variété des pigments utilisés aujourd'hui sur le marché, le recyclage mécanique des bouteilles de couleur en applications transparentes ou de couleur claire ne s'effectue pas à l'échelle (hormis pour les bouteilles bleu clair), mais il existe des technologies pour recycler mécaniquement les bouteilles de couleur en nouvelles bouteilles de couleur.

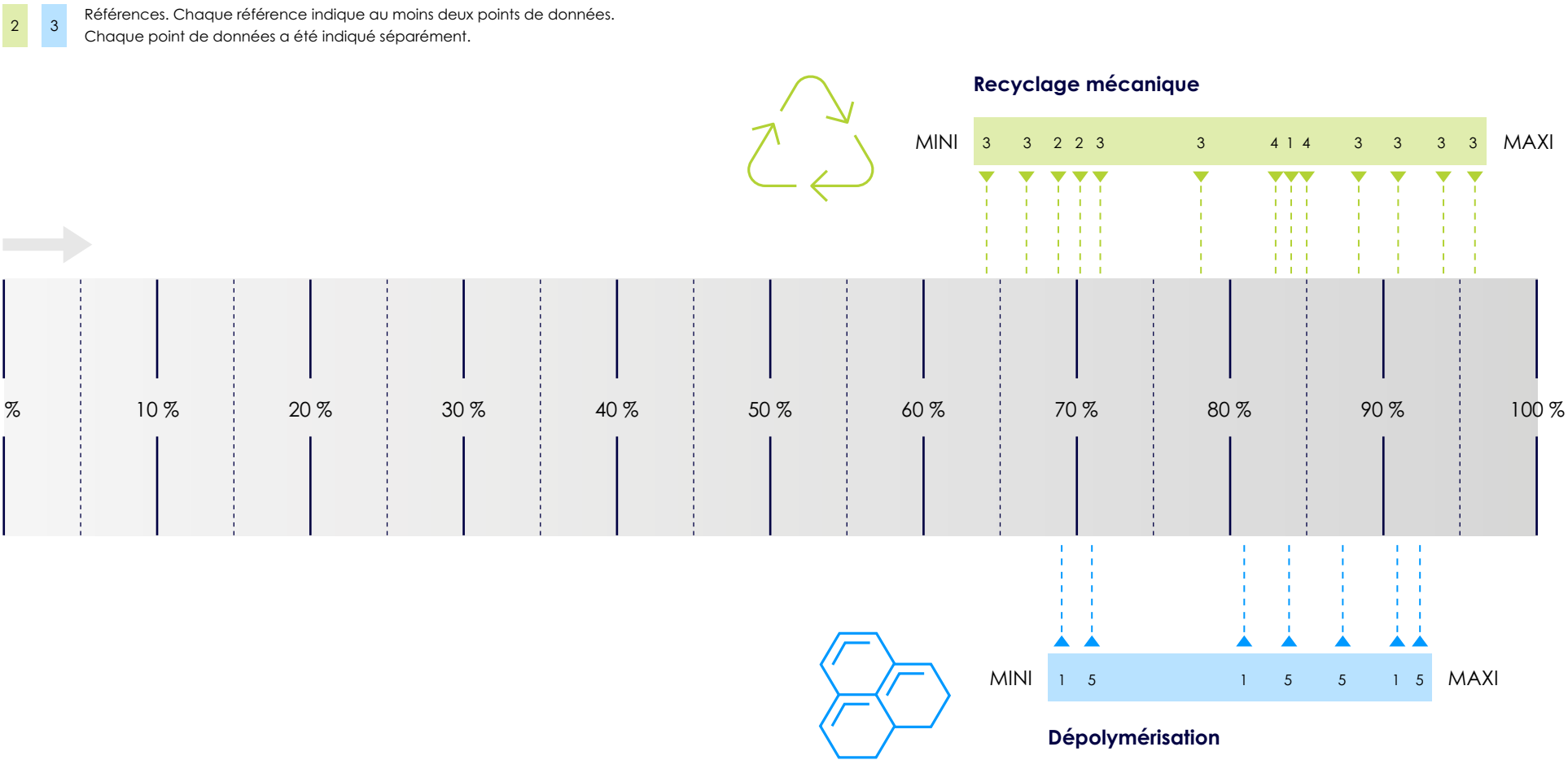
n Directives de la Commission européenne

Figure 12

La dépolymérisation et le recyclage mécanique du PET donnent des rendements similaires

- Les rendements de matière-à-matière de la dépolymérisation sont généralement similaires aux rendements du recyclage mécanique
- Les plages de rendement sont fondées sur les moyennes consolidées des diverses technologies et ne sont pas spécifiques aux méthodes de recyclage du PET pour produits sensibles. Pour le recyclage mécanique comme chimique, les rendements des processus dépendent de la qualité de la matière première
- Les recherches publiées ne donnent pas d'informations granulaires et comparables plus spécifiques, qui indiqueraient par exemple le type de matière première et de plastique recyclé produit (ex : pour produits sensibles ou non)

Plage de rendement de matière-à-matière du PET par traitement des plastiques recyclés



Note : rendement obtenu à partir de 1 000 kg de déchets plastiques avec des additifs avant l'entrée dans l'installation de recyclage (inclut les étapes de pré-tri, lavage et extrusion dans l'installation). Les rendements du pré-tri ont été appliqués aux rendements de la dépolymérisation par référence (5) par rapport à la référence (1).

(1) Closed Loop Partners, Transition to a Circular System for Plastic, 2021, (2) G. Lonca, et autres., Assessing scaling effects of circular economy strategies: A case study on plastic bottle closed-loop recycling in the USA PET market, 2020 (3) I. Antonopoulos et autres, Recycling of post-consumer plastic packaging waste in the EU: Recovery rates, material flows, and barriers, 2021 (4) Systemiq, Achieving Circularity in Norway, 2021 (5) Eunomia, State of Play: Chemical Recycling, 2020.

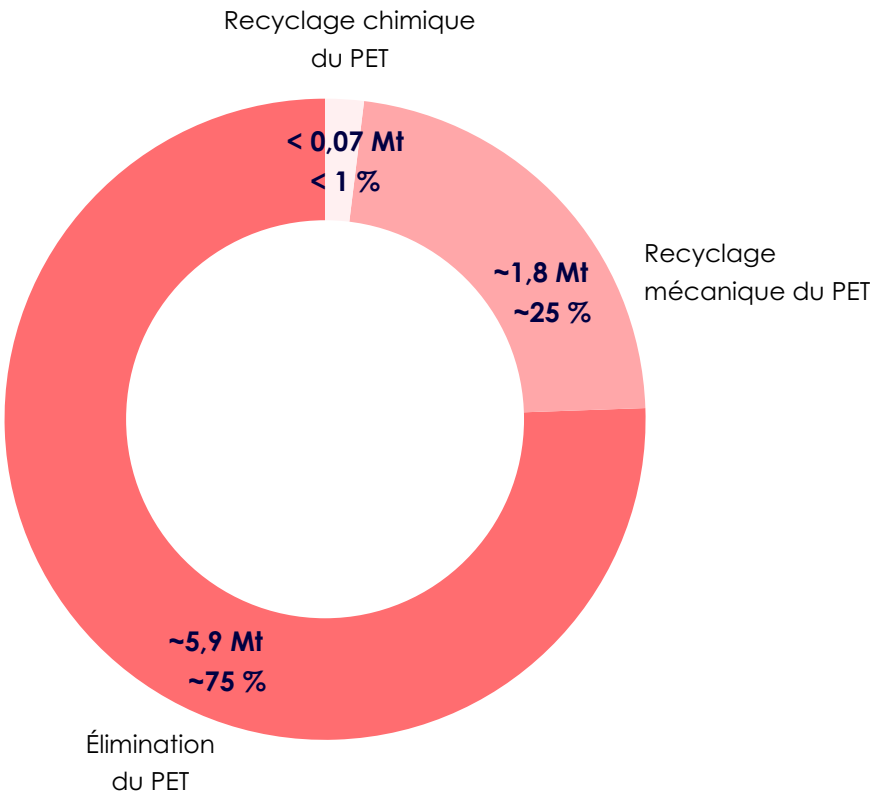
Figure 13

D'importants engagements dans le sens de la dépolymérisation du PET ont récemment été annoncés

- Pour le PET/polyester, la capacité européenne de recyclage chimique (dépolymérisation) installée est actuellement de 0,07 Mt par an⁴ - l'équivalent de moins de 1 % du PET/polyester utilisé en Europe
- La construction en Europe de grandes installations de dépolymérisation du PET à l'échelle industrielle a récemment été annoncée^o, qui couvrirait un volume supplémentaire de 5 % du PET/polyester utilisé en Europe :
 - Installation d'Eastman en France pour le traitement de 160 000 tonnes par an¹⁵
 - Installation de Carbios / Indorama Ventures en France pour le traitement de 50 000 tonnes par an¹⁸
 - Installation d'Infinite Loop / Groupe Suez en France pour le traitement de 70 000 tonnes par an¹⁷
 - Installation d'Axens / Toray Films Europe en France pour le traitement de 80 000 tonnes par an¹⁶
 - Future installation de Ioniqa aux Pays-Bas pour le traitement de 10 000 tonnes par an¹⁹

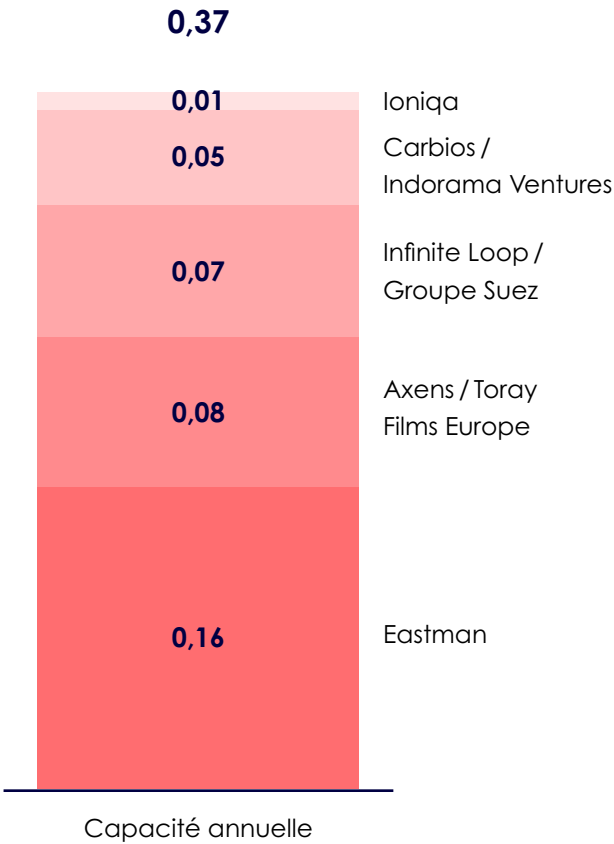
Destination du PET après usage, par an et par type de technologie, 2020

Million de tonnes/an
Part du PET/polyester utilisé en Europe (%)



Capacité annoncée pour les futures installations devant utiliser les technologies de recyclage chimique du PET en Europe

Millions de tonnes/an



Note : la dépolymérisation du PET représente la capacité plutôt que l'utilisation.
Sources : (1) PET Market: State of Play 2022, Eunomia (2022), et (2) How circular is PET?, Eunomia and Zero Waste Europe (2022).
o Les informations actuellement accessibles au public ne permettent pas de savoir si les projets des fournisseurs de technologie ont obtenu l'autorisation d'investissement finale.

Éclairages de la recherche

pour des approches de l'économie circulaire complémentaires dans le système PET/polyester

Les études publiées apportent des éclairages pour guider les industriels et les décideurs politiques sur l'application complémentaire de différentes approches de l'économie circulaire (réduction, réutilisation, substitution, reconception, recyclage mécanique et chimique) en vue de réduire les volumes de déchets plastiques et la dépendance aux matières premières à base fossile, d'augmenter l'efficacité des ressources et d'abaisser les niveaux d'émissions de gaz à effet de serre.

Les éclairages de la recherche sur les incidences négatives des différentes approches de l'économie circulaire sur l'environnement sont de nature à guider la complémentarité, en particulier pour les émissions de GES, la génération de déchets plastiques et la demande de ressources primaires à base fossile. L'évaluation de la complémentarité doit également tenir compte de la bonne adaptation des matières premières, des facteurs économiques et de la demande du marché.

Il n'existe pas de modèle de système publié, pour le système PET/polyester, qui permette d'évaluer au niveau système les incidences de différents scénarios sur l'environnement pour l'application complémentaire des différentes approches de l'économie circulaire. Les déficits de connaissances et les incertitudes entourant le système PET/polyester entravent les évaluations de la complémentarité, aussi faudrait-il concevoir des outils de modélisation et d'évaluation des scénarios qui soient capables d'évaluer la sensibilité des principaux paramètres de la modélisation et des hypothèses de départ.



Il n'existe pas de modèle de système publié, pour le système PET/polyester, qui permette d'évaluer au niveau système les incidences de différents scénarios sur l'environnement.

3.1

Réduction, réutilisation, substitution et reconception

De nombreuses études indiquent qu'il est possible d'obtenir des bénéfices environnementaux et socioéconomiques positifs par la réduction du PET/polyester évitable, le passage du modèle à usage unique à celui de la réutilisation (dans certains cas) et l'orientation du choix des matériaux vers des alternatives à plus faible impact (y compris en passant des matériaux à fort impact au PET/polyester ou en sortant du PET/polyester pour aller vers d'autres matériaux).

Les études mettent en lumière la nécessité d'appliquer largement des stratégies de réduction et de réutilisation dans l'ensemble du système des plastiques afin de rester dans les limites du bilan carbone qui est nécessaire pour respecter l'Accord de Paris^p.

Les bénéfices et les limitations des approches de la réduction, de la réutilisation et de la substitution dépendent beaucoup de l'application du produit considérée (Figure 14). Il manque des données probantes sur l'ampleur globale de l'opportunité de réduction, de réutilisation et de substitution - que le matériau de substitution soit du PET/polyester ou non, dans les cas où cela serait bénéfique sur le plan environnemental.

L'industrie et un certain nombre d'études nous disent que la conception orientée recyclage (tant pour les emballages que pour les textiles) est nécessaire pour permettre de libérer tout le potentiel du recyclage mécanique et de la dépolymérisation du PET/polyester.

^p Eunomia & Zero Waste Europe (2022) – Is Net Zero Enough for the Material Production Sector. Les estimations indiquent qu'il faudrait que la demande de plastique diminue de 3 % par an pour réduire la consommation annuelle de moitié d'ici 2050 et la consommation par habitant de 75 %.

Figure 14 (voir également la page suivante)

Les approches de la réduction, de la réutilisation et de la substitution sont essentielles, et leur application dépend beaucoup du produit considéré. De plus, la reconception est nécessaire pour le PET/polyester restant, afin de libérer tout le potentiel du recyclage

Produit/ application	Levier	Applications potentielles	Limitations
Bouteilles 	Réduction	Il est possible de réduire l'utilisation du plastique pour les bouteilles en réduisant le poids des bouteilles ou en faisant évoluer le comportement des consommateurs	Difficulté à faire évoluer le comportement des consommateurs à l'échelle
	Réutilisation	Les bouteilles font partie des principales applications du plastique qui présentent le plus fort potentiel d'évolution vers la réutilisation et vers de nouvelles méthodes de mise en œuvre ^{ii,iii} Les matériaux PET peuvent convenir à la fabrication de contenants ou de bouteilles réutilisables, lesquels pourraient ensuite être recyclés une fois devenus non réutilisables	Développement des infrastructures et évolution du comportement des consommateurs ; évaluation des impacts de la logistique et des infrastructures de la réutilisation
	Substitution	Il existe des matériaux de substitution (ex : verre, aluminium, papier)	Faible applicabilité dans certains cas, en raison des émissions potentielles de GES et des incidences des matériaux alternatifs sur les coûts ^{i,27}
	Reconception	Passer des bouteilles opaques ou de couleur aux bouteilles transparentes/incolores et veiller à ce que les enveloppes/étiquettes et les colles ne posent pas problème pour le recyclage ^{vii}	Dans une minorité de cas, les bouteilles de couleur ou opaques sont indispensables pour protéger les liquides sensibles à la lumière

Voir la suite de cette figure à la page suivante

Sources : (i) Systemiq, Breaking the Plastic Wave, (ii) Systemiq, Reshaping Plastics, (iii) Fondation Ellen MacArthur, Catalysing action, 2017, (iv) McKinsey et GFA, Fashion on Climate, (v) Zero Waste Europe, Reusable vs Single-Use Packaging, (vi) Fondation Ellen MacArthur, The New Plastics Economy, (vii) Consumer Goods Forum Golden Design Rules (2021) www.theconsumergoodsforum.com/environmental-sustainability/plastic-waste/key-projects/packaging-design/, (viii) Sorting for Circularity Europe, Fashion For Good (2022) <https://reports.fashionforgood.com/report/sorting-for-circularity-europe/>

Figure 14 (suite)

Produit/ application	Levier	Applications potentielles	Limitations
	Réduction	Il est possible de réduire l'utilisation du plastique pour les barquettes en réduisant le poids des barquettes, en faisant évoluer le comportement des consommateurs ou en réduisant les volumes d'emballages inutiles	Difficulté à faire évoluer le comportement des consommateurs à l'échelle
	Réutilisation	Les applications de services alimentaires présentent un fort potentiel d'évolution vers la réutilisation et vers de nouvelles méthodes de mise en oeuvre ^{ii,iii} Les matériaux PET peuvent convenir à la fabrication de contenants ou de bouteilles réutilisables, lesquels pourraient ensuite être recyclés une fois devenus non réutilisables	Développement des infrastructures et évolution du comportement des consommateurs ; évaluation des impacts de la logistique et des infrastructures de la réutilisation
	Substitution	Il existe des matériaux de substitution (ex : à base de fibre de papier)	Évaluation au cas par cas des émissions de GES potentielles, des incidences des matériaux alternatifs sur les coûts, de la recyclabilité et de l'incidence sur la conservation des aliments
	Reconception	Pour toutes les barquettes en PET - ne plus utiliser le noir de carbone indétectable et utiliser du PET transparent et incolore, passer au PET monomatériau lorsque cela est possible, veiller à ce que les étiquettes, les colles, et les films d'impression et d'opercule ne posent pas problème pour le recyclage ^{vii}	Dans certains cas, on utilise des pigments de couleur afin de pouvoir utiliser du PET recyclé qui conserve la pigmentation d'origine
	Réduction	Réduire l'important gaspillage de vêtements invendus - ex : grâce aux technologies de prévision des stocks, à la modélisation 3D et à l'évolution du comportement des consommateurs	L'amélioration de la prévision de la demande et de la gestion des stocks peut nécessiter des investissements ^{iv}
	Réutilisation	Important potentiel de réutilisation (ex : remise à neuf, recommercialisation, prolongement de la durée de vie) afin de réduire les émissions de GES, tout en réalisant des économies ^{iv}	Le transfert des textiles de faible qualité depuis les régions à hauts revenus vers les régions à bas revenus peut augmenter potentiellement les flux de déchets ^{iv}
	Substitution	Potentiel de réduction de l'impact environnemental grâce aux nouvelles fibres synthétiques artificielles produites à partir de matière première naturelle (ex : lyocell, PHA) ^{iv}	Évaluation au cas par cas des émissions de GES potentielles, des impacts des matériaux alternatifs sur les coûts et de la recyclabilité
	Reconception	Conception orientée réutilisation (durabilité) et conception orientée recyclage (chimique et mécanique) privilégiant le monomatériau (en évitant les mélanges de différents types de fibres) et réduisant les perturbateurs du recyclage ^{viii}	Tendance des modèles économiques à aller vers la <i>fast fashion</i> / les vêtements à courte durée ; tendance des créateurs de vêtements à opter pour les mélanges de matériaux

Sources : (i) Systemiq, Breaking the Plastic Wave, (ii) Systemiq, Reshaping Plastics, (iii) Fondation Ellen MacArthur, Catalysing action, 2017, (iv) McKinsey et GFA, Fashion on Climate, (v) Zero Waste Europe, Reusable vs Single-Use Packaging, (vi) Fondation Ellen MacArthur, The New Plastics Economy, (vii) Consumer Goods Forum Golden Design Rules (2021) www.theconsumergoodsforum.com/environmental-sustainability/plastic-waste/key-projects/packaging-design/, (viii) Sorting for Circularity Europe, Fashion For Good (2022) <https://reports.fashionforgood.com/report/sorting-for-circularity-europe/>

3.2

Recyclage mécanique et recyclage chimique

Des études indiquent que pour les filières européennes de l'emballage et des textiles en PET/polyester, l'application complémentaire du recyclage mécanique et du recyclage chimique peut permettre d'augmenter les taux de recyclage et l'offre de PET/polyester recyclé de haute valeur (pour produits sensibles), de réduire les volumes de déchets plastiques et la pollution de l'environnement et de réduire les émissions de GES.

Des chercheurs et des parties prenantes craignent cependant qu'une concurrence non réglementée, autour du recyclage des matières premières, ait des conséquences aggravantes sur l'environnement, si les impacts relatifs des différentes technologies n'étaient pas pris en compte.

La littérature visée par des pairs documente largement l'évaluation environnementale du recyclage mécanique du PET/polyester. Ainsi, sur sept analyses du cycle de vie (ACV) identifiées dans la littérature portant sur l'étude de la performance du recyclage chimique et mécanique du PET, toutes celles dont le périmètre incluait le recyclage mécanique font état d'écobénéfices clairs, comparé aux filières européennes de fabrication et/ou d'élimination des déchets existantes (les conditions de comparaison classiques varient suivant les études) (Figure 15, voir également l'Annexe B).

La littérature visée par des pairs documente moins l'évaluation environnementale du recyclage chimique du PET/polyester. Néanmoins, sur les sept analyses du cycle de vie (ACV) identifiées dans la littérature, six indiquent que le recyclage chimique du PET par la dépolymérisation offre des écobénéfices, comparé aux filières européennes de fabrication du PET et/ou d'élimination des déchets classiques (incinération ou mix moyen actuel de mise à la décharge et d'incinération ; les conditions de comparaison

classiques varient suivant les études). Le recyclage chimique génère davantage d'émissions de GES que le recyclage mécanique (d'après quatre des cinq ACV qui évaluaient les technologies de recyclage chimique et mécanique) (Figure 15, voir également l'Annexe B).

On ne dispose que de peu d'analyses du cycle de vie publiées, visées par des pairs et pleinement reconnues, pour ce qui concerne les différentes formes de dépolymérisation du PET/polyester dans les différentes zones géographiques. De la même façon, il n'y a que très peu de recherches publiées qui évaluent la mesure dans laquelle la qualité du produit, la tolérance à la matière première, le rendement et les émissions évolueront au fur et à mesure de la maturation des technologies, pour le recyclage chimique comme mécanique et les procédés de tri/lavage correspondants.

L'aptitude de la matière première au recyclage mécanique et chimique dépend d'un certain nombre d'aspects techniques, économiques et réglementaires. Le recyclage mécanique en PET recyclé de haute valeur convient particulièrement aux applications telles que les bouteilles en PET transparentes, dans lesquelles les flux d'intrants peuvent être étroitement contrôlés, et la réglementation de l'UE autorise l'utilisation du PET recyclé dans les applications pour produits sensibles. L'industrie et de nouvelles études de lignes de recyclage nous disent que les boucles de recyclage mécanique répétées ou contaminées peuvent dégrader les propriétés fonctionnelles (et la couleur) du plastique recyclé, ce qui pourrait compliquer l'atteinte de hauts niveaux de recyclage de bouteille-à-bouteille^{q,30,31}. En conditions de laboratoire cependant, il a été démontré que le recyclage mécanique d'un mélange composé à 75 %

de PET recyclé et à 25 % de PET vierge était viable et ne détériorait pas les propriétés fonctionnelles¹⁴. L'ajout d'additifs peut également contribuer à améliorer les propriétés du recyclat³⁵. Les boucles de recyclage chimique répétées ne devraient pas dégrader les propriétés fonctionnelles du plastique recyclé, car chaque boucle de recyclage produit du plastique de qualité vierge.

Il n'existe que peu de recherches publiées sur les aspects techniques, économiques et réglementaires qui détermineraient l'aptitude de la matière première au recyclage mécanique et chimique. Il n'y a pas d'informations publiées concernant l'aptitude de la matière première au recyclage des mix de matières premières, telles que les barquettes et textiles à matériaux multiples qui mélangent différentes fibres synthétiques et naturelles, en plus du polyester. Il n'y a pas de principes directeurs publiés et pleinement reconnus pour l'optimisation de la dépolymérisation du PET/polyester. Il n'y a pas non plus suffisamment de recherches publiées sur les bénéfices environnementaux ou économiques du recyclage en boucle fermée en applications identiques ou de plus haute valeur, comparé au recyclage en boucle ouverte en applications de faible valeur.

Une synthèse des éclairages qu'apporte la recherche et des déficits de connaissances, pour la modélisation de l'évaluation de la complémentarité, est présentée en Annexe A.

q Seulement un quart du PET/polyester est actuellement recyclé, de sorte que la dégradation ne pose pas encore de problèmes matériels, mais elle devrait être prise en compte dans le cadre des efforts qui sont fournis pour aboutir à la création d'une filière du PET plus circulaire.

Figure 15

Les analyses du cycle de vie (ACV) indiquent qu'en Europe, le recyclage chimique génère moins d'émissions de GES que les filières conventionnelles de la fabrication du PET et de l'élimination des déchets, et davantage d'émissions que le recyclage mécanique.

Six ACV sur sept identifiées dans la littérature indiquent que le recyclage chimique du PET apporte des écobénéfices, comparé aux filières européennes classiques de fabrication du PET et d'élimination des déchets. Les méthodes de comparaison des filières classiques varient cependant suivant les études, et tiennent compte des différentes filières européennes types d'élimination des déchets (incinération ou mix actuel de mise à la décharge et d'incinération) et des procédés de production de PET vierge conventionnels. Cinq ACV qui ont évalué les méthodes de recyclage mécanique et chimique indique que le recyclage chimique génère davantage d'émissions de GES que le recyclage mécanique.

Commanditaire	Auteur	Date	Région	Technologie	Périmètre	Émissions du recyclage plus faibles que pour les filières classiques	Émissions du recyclage mécanique plus faibles que pour le recyclage chimique	Commentaires
Closed Loop Partners	Environmental Clarity	2021	Amérique du nord	Dépolymérisations diverses	Cradle to Gate (de l'installation de récupération de la matière au produit polymère)	✓	✓	
Eastman	Quantis	2022	Amérique du nord	Méthanolyse	Cradle to Gate	✓	S.O.	
S.O.	Schwarz et autres	2021	Europe	Glycolyse	Production de polymères, produits évités dans le traitement de recyclage	✓	✗	La transformation, la collecte des déchets et le traitement n'entrent pas dans le périmètre du système
S.O.	Uekert et autres	2022	Amérique du nord	Hydrolyse enzymatique	Cradle to Gate (PET recyclé), Cradle to Grave (élimination) (PET vierge)	✗	S.O.	L'hydrolyse enzymatique présente des différences de procédé par rapport aux autres technologies de dépolymérisation
Ioniqa	CE Delft	2018	Europe	Hydrolyse	Divers (3 cas)	✓	✓	
Ioniqa	CE Delft	2019	Europe	Hydrolyse	Cradle to Gate	✓	✓	
Petcore Europe	Plastics Europe CE Delft	2012-2019	Europe	Dépolymérisation Non spécifié	Cradle to Gate	✓	✓	

Note : une transformation supplémentaire (ex : conversion en acide téréphtalique et repolymérisation) serait nécessaire pour la synthèse du PET pour la majorité des infrastructures existantes³⁶.
S.O. : les analyses du cycle de vie (ACV) n'incluent pas le recyclage mécanique dans le cadre des analyses.

Conclusion

Dans certains pays d'Europe, la bonne aptitude des bouteilles en PET transparentes pour boissons au recyclage a donné au PET/polyester la réputation de « système plastique circulaire ». La synthèse des recherches rapportées dans ce rapport remet cette affirmation en question pour les bouteilles en PET et ne l'appuie pas pour ce qui est du système PET/polyester dans son ensemble. Toutefois, les recherches mettent aussi en lumière les avantages relatifs du PET/polyester à la fois pour le recyclage mécanique et le recyclage chimique, et l'opportunité de mise à l'échelle du recyclage mécanique, du recyclage chimique et de la réutilisation - pour réduire les volumes de déchets et les émissions de gaz à effet de serre, améliorer l'offre de matériaux recyclés de haute valeur et découpler le système PET/polyester des matières premières à base fossile.

Les éclairages des recherches publiées donnent des repères pour la conception d'un nouveau système fondé sur la complémentarité. Cette étude de synthèse pointe cependant d'importants déficits de connaissances. Il n'existe pas d'outil d'évaluation des modèles de système et des scénarios pour le PET/polyester en Europe ; or un tel outil apporterait des éclairages précieux et des pistes à l'industrie et aux décideurs politiques, à condition qu'il soit conçu pour tenir compte des déficits de connaissances et des incertitudes.

Ce modèle sera l'objet de la phase suivante de ce projet, sur la base des recherches identifiées dans cet article et d'une analyse complète du système, pour permettre de suivre une pensée systémique, de comparer les scénarios de complémentarité et de nourrir le dialogue entre les parties prenantes. Le modèle utilise l'analyse des flux de matière pour suivre les flux de PET dans l'ensemble du système du plastique et comprendra une estimation des émissions pour chaque étape du système. Ses éléments de sortie comprendront également le volume de PET arrivant en fin de vie via la décharge, l'incinération, la mauvaise gestion dans la nature et les volumes finissant dans des

solutions circulaires telles que le recyclage mécanique et chimique. Des scénarios prédéfinis seront introduits dans le modèle pour permettre de comprendre l'impact des scénarios de recyclage moléculaire et mécanique complémentaires par rapport aux scénarios non complémentaires. Les éléments de sortie et les éclairages du modèle seront rapportés dans un second livre blanc qui paraîtra en 2023.

Cette étude de synthèse reflète les études publiées disponibles et les interprétations faites par l'équipe d'étude avec l'aide de notre groupe de pilotage indépendant et d'experts-conseils. L'équipe qui a mené cette étude serait heureuse de prendre connaissance des questions, analyses critiques, points de données et autres informations pertinentes concernant toute étude publiée ou en cours qui ne serait pas référencée dans cet article.

r N'hésitez pas à nous contacter, à l'adresse plastic@systemiq.earth.

Notes



Bibliographie

- Transition to a Circular System for Plastics (Closed Loop Partners)
- PET Market in Europe – State of Play (Eunomia)
- PET Market in Europe – State of Play (Eunomia)
- How Circular is PET? (Eunomia)
- ReShaping Plastics (Systemiq)
- Fashion on Climate (McKinsey + Global Fashion Agenda)
- Non-technical challenges to non-mechanical recycling (Wrap)
- Climate impact of pyrolysis of waste plastic packaging in comparison with reuse and mechanical recycling (Zero Waste Europe)
- Environmental and Socioeconomic Impacts of Poly(ethylene terephthalate) (PET) Packaging Management Strategies in the EU (Bassi S. et al.)
- Chemical recycling: insights based on LCA (Delft University)
- Neste RE for more sustainable polymers and chemicals (Neste)

- Plastic Flow 2025 – Plastic Packaging Flow Data Report (Wrap)
- Wrap UK plastic packaging flows (Wrap)
- Global Commitment annual reporting (Ellen MacArthur Foundation)
- Research and identification of textile plants globally – focusing on fibre-to-fibre recycling for the fashion & textile industry (LifeStyle & Design Cluster)
- Circularity Study on PET Bottle to Bottle Recycling (Pinter, E. et al.)
- Scaling Textile Recycling in Europe – Turning waste into value (McKinsey)
- Closing the Loop – increasing fashion circularity in California (McKinsey)
- Mechanical Recycling of Packaging Plastics: A Review. (Macro-molecular Rapid Communications)
- Recycling of post-consumer plastic packaging waste in the EU: Recovery rates, material flows, and barriers. (Waste Management)
- A circular economy for plastics: Insights from research and innovation to inform policy and funding decisions (European Commission)
- Dynamic Material Flow Analysis of PET, PE, and PP Flows in Europe: Evaluation of the Potential for Circular Economy (Marie Eriksen et al.)

- “(supporting information) Dynamic Material Flow Analysis of PET, PE, and PP Flows in Europe:
- Evaluation of the Potential for Circular Economy (Marie Eriksen et al.)
- Plastics – The Facts 2020 (Plastics Europe)
- Plastics – The Facts 2021 (Plastics Europe)
- From Waste To Commodity (Minderoo KPMG)
- The Price of Plastic Pollution (Minderoo)
- Climate impact of pyrolysis of waste plastic packaging in comparison with reuse and mechanical recycling (Oko Institute ZWE)
- 2050 Packaging Material Demand (Oakdene Hollins)
- Packaging Unwrapped (WWF)
- Why pledges alone will not get plastics recycled: Comparing recyclate production and anticipated demand (Kahlert S; Bening C)
- What we waste (Reloop)
- EPR in the EU Plastics Strategy and the Circular Economy: A focus on plastic packaging (Institute for European environmental policy)
- Holistic Resource System (Tomra)
- A comparative assessment of standards and certification schemes for verifying recycled content in plastic products (Eunomia)

• Blueprint for plastics packaging waste: Quality sorting & recycling (Deloitte) • Mapping of the value chain for flexible plastic packaging in the UK (Suez) • Report on plastics recycling statistics 2020 Plastic (Recyclers Europe) • Non-mechanical Recycling of Plastics (Wrap) • Recycling Unpacked: Assessing the Circular Potential of Beverage Containers in the US (Metabolic) • Talking Trash: The corporate playbook for false solutions to the plastic crisis (Changing Markets Foundation) • RPET Global Monthly Market Overview (Wood Mackenzie) • Packaging plastics in the circular economy (EASAC) • Resource Effective and circular plastics flow (IVA) • A Circular solution to plastic waste (Boston Consulting) • El Dorado of Chemical Recycling (ZWE) • Increased EU Plastics Recycling Targets: Environmental, Economic and Social Impact Assessment (Deloitte) • Plastics – the Facts 2022 (Plastics Europe) • Chemical Recycling: State of Play (Eunomia)	• The Global Commitment 2021 Progress Report (EMF + UN) • Plastics Recycling: Using an economic-feasibility lens to select the next moves (McKinsey) • Europe's Missing Plastics (Material Economics) • Chemical Recycling: technologies, costs and capacity (Bloomberg) • Making Plastics Circular with Recycling (CEDO + Plastics Recyclers Europe) • Advanced Recycling: Opportunities for Growth (McKinsey) • Acetolysis of waste PET for upcycling and life-cycle assessment study (Peng Y. et al.) • Is Net Zero Enough for the Materials Sector Report (Eunomia Zero Waste Europe) • Study on the technical, regulatory, economic and environmental effectiveness of textile fibres recycling (European Commission) • Global Commitment 2022 Report (Ellen MacArthur Foundation United Nations) • Sorting for Circularity Europe (Circle Economy Fashion for Good) • Chemical Recycling PET (Petcore) • Strategic Possibility Routes of Recycled PET (Damayanti and Ho-Shing-Wu)	• Demand, consumption, reuse and recycling of clothing and textiles in Germany (Federal Association for Secondary Raw Materials and Waste Management) • Reducing personal clothing consumption: A cross-cultural validation of the comprehensive action determination model (Tina Joanesa et al.) • Climate Impact of Plastics (McKinsey) • Assessment of Carbon Footprint for the Textile Sector in France (Jérôme Payet) • Ensure productivity and high quality processability of the final RPET application with Sukano Masterbatches (Alessandra Funcia) • Improving food grade rPET quality for use in UK packaging (Wrap) • Environmental impact of textile reuse and recycling – A review (Gustav Sandin, Greg M. Peters) • Microplastics shedding from polyester fabrics (Mistra Future Fashion) • Sustainable Apparel Materials (Materials Systems Laboratory + Massachusetts Institute of Technology) • Analysis of the polyester clothing value chain to identify key intervention points for sustainability (Cristina Palacios-Mateo et al.)	• Guidance for fashion companies on design for recycling (Sandra Roos et al.) • Plastic in textiles: potentials for circularity and reduced environmental and climate impacts (European Environmental Agency) • Accelerating Circularity – Fall Update (Accelerating Circularity) • Vision of a circular economy for fashion (Ellen MacArthur Foundation)
--	---	---	--

Glossaire

Recyclage chimique

L'ensemble des procédés permettant de décomposer les polymères en monomères ou autres hydrocarbures pouvant servir de composantes essentielles ou de matière première dans la production de nouveaux polymères.

Circularité

La circularité est une mesure de l'efficacité des ressources - le degré auquel l'utilisation/la réutilisation des matériaux remplace les nouveaux matériaux vierges. Dans cette étude, l'indicateur de circularité est défini comme la part de la matière plastique qui est réduite, remplacée par des matériaux circulaires de substitution ou recyclée mécaniquement ou chimiquement. La circularité exclut le plastique éliminé de façon linéaire et le stock de plastique entrant.

Matériau pour produits sensibles

Matériau soumis à des réglementations spécifiques de l'Union Européenne et destiné à entrer en contact avec des aliments ou la peau (ex : produits cosmétiques ou pharmaceutiques).

Conception orientée recyclage (D4R - Design for recycling)

Le processus par lequel les entreprises conçoivent leurs produits et leurs emballages de façon à ce qu'ils soient recyclables.

Responsabilité élargie du fabricant

Dispositifs permettant aux fabricants de contribuer aux coûts de fin de vie des produits qu'ils mettent sur le marché.

Matière première

Toute matière première en vrac - vierge ou secondaire - qui constitue le principal intrant d'un processus de production industrielle³⁷. Actuellement, le plastique est largement produit à partir de matières premières pétrochimiques, c'est-à-dire de combustibles fossiles.

Incinération avec récupération d'énergie / Valorisation énergétique des déchets

La valorisation énergétique des déchets se rapporte à l'incinération des déchets (plastiques) avec récupération de l'énergie générée. Les systèmes de valorisation énergétique des déchets utilisent des déchets plastiques comme combustible pour produire de l'énergie.

Décharge

Site spécialement conçu et organisé pour l'élimination des déchets solides sur le sol. Les déchets sont généralement répandus en couches fines, qui sont ensuite recouvertes de terre³⁸.

Levier

Solution spécifique modélisée dans une intervention sur un système.

Recyclage mécanique

L'ensemble des opérations permettant de récupérer les plastiques après usage suivant des procédés mécaniques (broyage, lavage, séparation, séchage, regranulation, mélangeage) sans modifier significativement la structure chimique du matériau³⁷.

Granulé

Matière première standard utilisée dans la fabrication du plastique. Les granulés sont des pastilles ou des granules de taille uniforme faits de résines ou de mélanges de résines avec des additifs de mélangeage préparés pour des opérations de moulage par extrusion et de découpage en petits segments³⁸.

Plastique

Matériau contenant un haut polymère comme ingrédient essentiel et qui, à un certain stade de sa transformation en produit fini, peut être coulé dans la forme voulue³⁹.

Demande de plastique

La demande de plastique est définie comme correspondant au volume de matière plastique moins le volume de matière plastique obtenu via des leviers de réduction et de substitution.

Recyclat

Le recyclat est l'extrant des processus de recyclage qui peut servir directement de matière première secondaire pour la transformation du plastique.

Modèles de réutilisation

Remplacement des emballages à usage unique par des articles réutilisables détenus et gérés par l'utilisateur ou par des services et des entreprises qui fournissent la matière (nouveaux modèles de mise en œuvre).

Tri

Techniques et procédés de traitement physique permettant de séparer les matériaux dans les flux de déchets. Le tri s'effectue généralement dans des installations de récupération de matière (*MRF - Material Recovery Facilities*) ou des installations de récupération du plastique (*PRF - Plastic Recovery Facilities*) spécifiques. Le tri peut s'effectuer de façon automatique, avec des technologies de tri, ou manuelle.

Plastique vierge

Résine directe produite à partir de matières premières pétrochimiques telles que le gaz naturel ou le pétrole brut et qui n'a encore jamais été utilisée ni transformée.

Références

1. Plastics Europe. *Plastics – The Facts*. (2021).

2. Eunomia & Zero Waste Europe. *How Circular is PET?* (2022).

3. Andreasi Bassi, S., Tonini, D., Saveyn, H. & Astrup, T. F. Environmental and Socioeconomic Impacts of Poly(ethylene terephthalate) (PET) Packaging Management Strategies in the EU. *Environ. Sci. Technol.* **56**, 501–511. (2022).

4. Eunomia. *PET Market in Europe 2022 – State of Play*. (2022).

5. Circle Economy & Fashion for Good. *Sorting for Circularity Europe*. (2022).

6. Eurostat. Plastic packaging waste: 38% recycled in 2020. (2022).

7. Plastics Europe. *The Circular Economy for Plastics*. (2022).

8. Fondation Ellen MacArthur. Global Commitment 2022 Report. (2022).

9. Plastics Europe. General commitments. (2021).

10. Parlement européen. *Directive (UE) 2019/904 du Parlement européen et du Conseil du 5 juin 2019 relative à la réduction de l'incidence de certains produits en plastique sur l'environnement*. (2019).

11. Commission européenne. Écoconception pour des produits durables. (2022).

12. Commission européenne. Communication de la Commission au Parlement européen, au Conseil, au Comité économique et social européen et au Comité des régions. (2022).

13. Commission européenne. Directive cadre relative aux déchets. (2018).

14. Pinter, E. et autres. Circularity Study on PET Bottle-To-Bottle Recycling. *Sustainability* **13**, 7370. (2021).

15. Business France. Normandy: a hotspot for recycling PET plastics in Europe and around the world.

16. Axens. Axens and Toray Films Europe to boost Plastic Circular Economy with a new PET Chemical Recycling Plant in Saint-Maurice-de-Beynost (France). (2022).

17. Loop Industries, Inc. Loop Industries, Inc.: Loop Industries Announces Selection of Port-Jérôme, in Normandy, France, as Site for First European Infinite Loop Manufacturing Facility. (2022).

18. Carbios. Carbios to build in France its first-of-a-kind manufacturing plant for fully bio-recycled PET in partnership with Indorama Ventures. <https://www.carbios.com/en/carbios-to-build-in-france-its-plant/>.

19. Ioniqa. Ioniqa completes € 12M funding round. <https://ioniqa.com/ioniqa-completes-e-12m-funding-round/>.

20. Systemiq. *Breaking the Plastic Wave*. (2020).

21. Systemiq. *Reshaping Plastics*. (2022).

22. Agence européenne pour l'environnement. *Plastic in textiles: towards a circular economy for synthetic textiles in Europe*. (2021).

23. British Plastics Federation. Pots, Tubs and Trays.

24. Textile Exchange. *Preferred Fiber and Materials – Market report 2021*.

25. Joanes, T., Gwozdz, W. & Klöckner, C. A. Reducing personal clothing consumption: A cross-cultural validation of the comprehensive action determination model. *J. Environ. Psychol.* **71**, 101396. (2020).

26. Stefanini, R., Borghesi, G., Ronzano, A. & Vignali, G. Plastic or glass: a new environmental assessment with a marine litter indicator for the comparison of pasteurized milk bottles. *Int. J. Life Cycle Assess.* **26**, 767-784. (2021).

27. McKinsey. *Climate Impact of Plastics*. (2022).

28. Accelerating Circularity. *Project Europe Update Fall 2022*. <https://static1.squarespace.com/static/5e434df1c42dd46de2822ab1/t/6373e011328be9158c6448cc/1668538417199/ProjectEuropeUpdateFall2022> (2022).

29. Fondation Ellen MacArthur. *A New Textiles Economy*. <https://ellenmacarthurfoundation.org/a-new-textiles-economy> (2017).

30. Schyns, Z. O. G. & Shaver, M. P. Mechanical Recycling of Packaging Plastics: A Review. *Macromol. Rapid Commun.* **42**, 2000415. (2021).



31. Benyathiar, P., Kumar, P., Carpenter, G. & Mishra, D. Polyethylene Terephthalate (PET) Bottle-to-Bottle Recycling for the Beverage Industry: A Review. (2022) doi:10.3390/polym14122366.

32. Petcore Europe. NEW DEVELOPMENTS IN THE RECYCLING OF PET THERMOFORMS IN EUROPE. <https://www.petcore-europe.org/news-events/113-new-developments-recycling-pet-thermoforms.html> (2017).

33. WRAP. Non-technical challenges to non-mechanical recycling. (2022).

34. Closed Loop Partners. *Transition to a Circular System for Plastics*. (2021).

35. Delva, L. et autres. MECHANICAL RECYCLING OF POLYMERS FOR DUMMIES. 25.

36. S&P Global. Dimethyl Terephthalate (DMT) and Terephthalic Acid (TPA). (2021).

37. Fondation Ellen MacArthur & NPEC *The New Plastics Economy – Rethinking the future of plastics*. (2016).

38. The Association of Plastic Recyclers. Plastics Recycling Glossary.

39. ISO 472. Plastics – Vocabulaire.

Annexe A

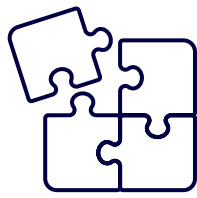
La synthèse a identifié un certain nombre d'éclairages de la recherche et de déficits de connaissances qui sont à prendre en compte pour cette analyse complémentaire au niveau système

Réduction, réutilisation, substitution et reconception



Éclairages de la recherche :

- Les stratégies de réduction et de réutilisation présentent un fort potentiel de réduction des impacts négatifs sur l'environnement mais ne seront pas réalisables ni bénéfiques pour toutes les applications de produits en PET/polyester
- La substitution de certains matériaux au PET/polyester pourrait être bénéfique dans certains cas, mais dans de nombreux cas peut être néfaste pour l'environnement.²⁷ De la même façon, la substitution du PET/polyester à d'autres matériaux peut dans certains cas avoir un impact positif sur l'environnement
- La conception orientée recyclage est nécessaire pour permettre de libérer tout le potentiel du recyclage mécanique et de la dépolymérisation du PET/polyester



Déficits de connaissances :

- Il manque des données sur l'ampleur globale de l'opportunité de réduction, de réutilisation et de substitution pour les applications du PET/polyester (bouteilles, barquettes, textiles), y compris sur la substitution du PET/polyester à d'autres matériaux, dans les cas où cela serait bénéfique sur le plan environnemental.

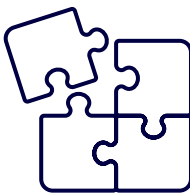
Annexe A

Recyclage chimique et recyclage mécanique



Éclairages de la recherche :

- Le recyclage mécanique convient particulièrement aux applications telles que les bouteilles en PET transparentes dans lesquelles les flux d'intrants peuvent être étroitement contrôlés, et la réglementation de l'UE autorise l'utilisation du PET recyclé dans les applications pour produits sensibles. Pour les bouteilles, les boucles de recyclage répétées ou contaminées peuvent dégrader les propriétés fonctionnelles (et la couleur) du plastique recyclé
- La dépolymérisation du PET/polyester permet de transformer certains produits difficiles à recycler en PET/polyester recyclé équivalent vierge adapté aux applications pour produits sensibles, quel que soit le type de matière première utilisé. Les boucles de recyclage chimique répétées ne devraient pas dégrader les propriétés fonctionnelles du plastique recyclé
- De nombreuses études indiquent que le recyclage mécanique et le recyclage chimique du PET/polyester génèrent moins d'émissions de GES que la production d'énergie par l'incinération des déchets et la mise à la décharge, si l'on tient compte de l'évitement de la production de plastique vierge
- De nombreuses études indiquent que le recyclage mécanique du PET génère moins d'émissions de GES que le recyclage chimique par la dépolymérisation



Déficits de connaissances :

- Informations publiées relatives à l'efficacité, aux limitations et à la tolérance à la matière première du recyclage mécanique, pour les textiles polyesters et les barquettes
- Informations publiées sur les plages de qualité du plastique en PET recyclé mécaniquement et sur la dégradation des propriétés fonctionnelles (et de la couleur) dans les multiples boucles de recyclage mécanique sans ajout d'intrant vierge, évaluées en conditions réelles (ex : contamination potentielle dans chaque boucle)
- Tendances de la réglementation, y compris pour le traitement réglementaire du recyclage chimique et l'utilisation dans des applications pour produits sensibles du PET recyclé mécaniquement et chimiquement
- Informations publiées relatives à l'efficacité, aux limitations et à la tolérance à la matière première du recyclage chimique, pour les textiles polyesters et les barquettes
- Comparaisons publiées et pleinement reconnues des émissions de GES pour différentes formes de dépolymérisation du PET/polyester
- Informations sur le rendement, publiées, pleinement reconnues et comparables entre différentes formes de recyclage chimique
- Bénéfices environnementaux ou économiques du recyclage en boucle fermée en applications identiques ou de plus haute valeur, comparé au recyclage en boucle ouverte en applications de faible valeur
- Mesure dans laquelle la qualité du produit, la tolérance à la matière première, le rendement et les émissions évolueront au fur et à mesure de la maturation des technologies, pour le recyclage chimique comme mécanique et les procédés de tri/lavage correspondants

Annexe B

Tableau de synthèse des ACV sur la dépolymérisation du PET (Partie 1 sur 2)

		Eastman/Quantis	CLP/Env. Clarity	Ioniqa/CEDelft 2018	Ioniqa/CEDelft 2019
Résultats	Émissions de GES du recyclage plus faibles que pour les filières classiques	✓	✓	✓	✓
	Émissions de GES du recyclage mécanique plus faibles que celles du recyclage moléculaire		✓	✓	✓
Description de l'étude¹	Buts de la recherche	Comparer l'empreinte du DMT obtenu par méthanolyse aux alternatives à base fossile	Évaluer les technologies, multiples et variées, de recyclage des déchets plastiques	Évaluer la technologie de Ioniqa par rapport au traitement classique des déchets	Comparer la dépolymérisation des barquettes en PET au recyclage mécanique et à la combustion
	Approche des modèles	Norme ISO 14040/44 pour l'analyse du cycle de vie ; revue critique par un panel d'experts tiers en ACV	Norme ISO 14040/44 pour l'analyse du cycle de vie ; revue critique par un panel tiers	ACV attributive simplifiée mettant l'accent sur l'impact sur le climat ou le ratio CO₂	Non spécifié <i>(fait référence à une étude confidentielle antérieure de Ioniqa)</i>
	Système analysé	Système DMT conventionnel de référence d'Eastman vs. technologie de la méthanolyse d'Eastman	Étude de 10 procédés de la technologie de recyclage moléculaire	Technologie de Ioniqa vs. PET tiré du pétrole vs. recyclage mécanique et production d'énergie par la combustion des déchets (EFW)²	Non spécifié <i>(fait référence à une étude confidentielle antérieure de Ioniqa)</i>
	Étapes de la chaîne de valeur (limites du système)	Cradle : Extraction de la matière première (vierge) ; fin de la vie précédente (déchets) Gate : fabrication du DMT/EG	De l'installation de récupération de la matière (MRF)³ à WPRT⁴ Syst. évité : fin de vie (décharge 83 %, incinération 17 %), vierge : de la mat. première à la fab.	3 systèmes aux limites variables. Démarrage à l'étape de collecte du recyclage, fin au niveau PET recyclé ou bouteille	Non spécifié <i>(fait référence à une étude confidentielle antérieure de Ioniqa)</i>
	Données de référence	Logiciel BaBi v.9.2.1.68. Ens. de données GaBi combinés et ACV internes Eastman	Données standard WPRT ; vérifiées par analyse chimique par des tiers	Non spécifié <i>(le rapport complet est confidentiel)</i>	Non spécifié <i>(fait référence à une étude confidentielle antérieure de Ioniqa)</i>
	Horizon de temps et région	2020 avec matière première attendue en 2023 ; Am. du nord	Moy. 2019 réseau électrique U.S.	Europe, publié en 2018. Données d'analyse non spécifiées	Non spécifié <i>(fait référence à une étude confidentielle antérieure de Ioniqa)</i>

Annexe B

Tableau de synthèse des ACV sur la dépolymérisation du PET (Partie 2 sur 2)

		Uekert et autres 2022	Schwarz et autres 2021	Petcore
Résultats	Émissions de GES du recyclage plus faibles que pour les filières classiques	⊗	✓	✓
	Émissions de GES du recyclage mécanique plus faibles que celles du recyclage moléculaire		⊗	✓
Description de l'étude¹	Buts de la recherche	Évaluer l'hydrolyse enzymatique par rapport aux autres procédés de recyclage et de synthèse	Évaluer la performance de 10 technologies de recyclage parvenues à des niveaux de maturité technologique différents	Évaluer la dépolymérisation du PET par rapport aux mesures conventionnelles
	Approche des modèles	ACV sur la base du procédé. SimaPro avec méthodes TRACI2.1 U.S. 2008 et AWARE	Modèle de matrice d'ACV Données et param. combinés en fonctions (R Studio 3.6.0 & ggplot2)	Moy. issue des études ACV sur la base de modèles de procédé pour les opérations industrielles à l'échelle.
	Système analysé	Procédé d'hydrolyse enzymatique du PET par Aspen Plus ; inventaires du cycle de vie pour expansions à partir du système	25 polymères avec demande de 0,2 Mt/an ; sélection des tech. de recyclage les plus performantes	Non spécifié
	Étapes de la chaîne de valeur (limites du système)	Cradle : extraction de la mat. prem. ; Gate : production du rPET ; Grave : élimination du vPET (20 %, dont 80 % décharge)	Production de granulés de polymère, impacts du traitement de recyclage et produits évités	Cradle to Gate. Collecte, tri, prétraitement ; exclut le CO₂ évité produit par incinération
	Données de référence	Inventaires du cycle de vie Ecoinvent 3.3 ; Bases de données US et monde	Matériaux, émissions et combustibles : Ecoinvent 3.4. Données Europe [RER] avec SimaPro 8	PlasticsEurope Ecoprofiles (Éthylène 2012, BTX 2013, PTA 2016, PET 2017), SRP Ecoprofile 2017, CE Delft 2019
	Horizon de temps et région	Amérique du nord	Europe (divers ; différentes sources)	Europe