

GISEMENTS DE DECHETS PLASTIQUES POUVANT ETRE TRAITES PAR RECYCLAGE CHIMIQUE ET PHYSICO-CHIMIQUE EN FRANCE



EXPERTISES

SYNTHESE

Nov
2022

REMERCIEMENTS

Alice GUEUDET (ADEME)
Aurèle REPETO (Polymeris)
Aurèle TISSERANT (Direction Générale des Entreprises)
Bertrand REYGNER (Ecologic)
Benedicte COUFFIGNAL (RECORD)
Camille HABERT (Total Energies)
Carole PAWLOWSKI (PlasticsEurope)
Clémence LIEBERT (CCFA)
Doris NICKLAUS (Ministère de l'Ecologie)
Eric QUENET (Total Energies)
Edouard CARTERON (ecosystem)
Emmanuelle BUFFET (Elipso)
Emmanuelle SCHLOESING (Elipso)
Fabrice ABRAHAM (Renault)
Fabien CAMBON (Eco-mobilier)
Florence DE MENGIN FONDRAGON (Valdelia)
Gilles DENNLER (IPC)
Guillaume GAMON (CITEO)
Jean-Yves DACLIN (PlasticsEurope)
Laure Morice (ecosystem)
Laure Hugonet (AXELERA)
Marc MADEC (Polyvia)
Marianne Fleury (ecosystem)
Mickaël GRAS (FCE-CFDT)
Nicolas LE BIGOT (CCFA)
Nolwenn TOUBOULIC (ADEME)
Olivier GILLE (Elastopôle)
Olivier STEMLER (DGE)
Oscar SIMON (Direction Générale des Entreprises)
Rémi BEULQUE (Eco-mobilier)
Sabine ZARIATTI (SUEZ)
Sandra LE BASTARD (ADEME)
Sebastien BECLIN (AXELERA)
Sophie GENIER (CITEO)
Stéphanie AUBIER (Direction Générale des Entreprises)
Thomas ETIEN (CITEO)
Vincent MAGES (France Chimie)

CITATION DE CE RAPPORT

ADEME, Erwan Harscoët, Sabine Yousfi, Federica Ammenti. 2022. ETUDE DES GISEMENTS DE DECHETS PLASTIQUES POUVANT ETRE TRAITES PAR RECYCLAGE CHIMIQUE ET PHYSICO-CHIMIQUE EN FRANCE. 33 pages.

Cet ouvrage est disponible en ligne <https://librairie.ademe.fr/>

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'oeuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Ce document est diffusé par l'ADEME

ADEME

20, avenue du Grésillé

BP 90 406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 2021MA000087

Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par : Deloitte Sustainability France

Coordination technique - ADEME : LE BASTARD Sandra

Direction/Service : DEC/SER - Service Ecoconception et Recyclage

1. CONTEXTE DU PROJET	7
2. METHODOLOGIE DE L'ETUDE	8
2.1. Phase 1 – Identification des gisements de déchets pouvant être candidats aux différentes technologies de recyclage chimique et physico-chimique en France.....	8
2.2. Phase 2 - Identification des technologies de recyclage chimique et physico-chimique applicables aux gisements identifiés en Phase 1.....	8
2.3. Phase 3 – Evaluation des couples [gisement-technologie]	8
3. QUANTIFICATION DES GISEMENTS DE DECHETS PLASTIQUES POUR LESQUELS UNE SOLUTION DE RECYCLAGE EST RECHERCHEE	10
3.1. Plastiques issus des Déchets d'Equipements Electriques et Electroniques (DEEE)	11
3.2. Plastiques issus des emballages ménagers	12
3.3. Plastiques issus des emballages industriels et commerciaux.....	13
3.4. Plastiques agricoles	13
3.5. Plastiques issus des Véhicules Hors d'Usage (VHU)	13
3.6. Plastiques issus des Textiles (TLC) ménagers	14
3.7. Plastiques issus des Déchets d'Éléments d'Ameublement (DEA).....	14
3.8. Plastiques issus du Bâtiment et revêtements de sol	15
4. ADEQUATION DES TECHNOLOGIES DE RECYCLAGE CHIMIQUE ET PHYSICO-CHIMIQUE AUX GISEMENTS DE DECHETS PLASTIQUES EXISTANTS	16
CONCLUSIONS / PERSPECTIVES	20
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	23
INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES.....	24
SIGLES ET ACRONYMES	25
ANNEXES.....	26
ANNEXE I : Critères de sélection des gisements avec un potentiel de valorisation par recyclage chimique et physico-chimique.....	26
ANNEXE II : Critères de sélection des gisements avec un potentiel de valorisation par recyclage chimique et physico-chimique.....	27
< 80%.....	27
ANNEXE III : Liste des développeurs analysés.....	29

RÉSUMÉ

Grâce à leurs caractéristiques fonctionnelles et à leur applicabilité dans de nombreux secteurs, les matières plastiques constituent un produit extrêmement prisé par plusieurs industries. En effet, avec 9,3% de la demande totale à l'échelle européenne, la France est le troisième pays le plus consommateur de plastique au sein de l'Union Européenne en 2020. En outre, le recyclage des matières plastiques tient une place importante dans l'ambition soutenue au niveau européen par la stratégie plastique transcrite dans la directive N°2019/904 du 5 juin 2019 relative à la réduction de l'incidence de certains produits en plastique sur l'environnement, mais aussi au niveau français par la loi relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire (Loi AGECE), promulguée le 10 février 2020. Au travers de cette loi, la France s'est dotée d'un objectif ambitieux de tendre vers 100% de plastiques recyclés d'ici à 2025. A cet objectif de recyclage, s'ajoutent des objectifs en termes d'intégration de matières premières de recyclage.

Actuellement le recyclage se fait surtout par voie mécanique. Cependant, les plastiques utilisés aujourd'hui sont en effet de natures diverses et variées, parfois contaminés ou complexes à traiter, impactant directement la qualité de la matière première secondaire produite lorsque le recyclage mécanique est possible. Ces procédés ne permettent donc pas toujours d'atteindre toutes les propriétés demandées par les transformateurs pour certaines applications.

Les technologies de recyclage chimique et physico-chimique constituent une solution complémentaire au recyclage mécanique qui reste préférable quand envisageable. Le recyclage chimique permet de produire des résines recyclées avec des qualités comparables à celles des résines vierges, et sont donc appelées à contribuer à l'amélioration des taux de recyclage actuels afin de favoriser la transition vers une économie circulaire en France.

Dans ce contexte, cette étude a pour objectif de quantifier les gisements de déchets plastiques valorisables en France dans plusieurs secteurs (DEEE, emballages, VHU, TLC, DEA, Bâtiment), et d'analyser les voies les plus prometteuses de recyclage chimique et physico-chimique pour traiter ces gisements en attente d'une solution de valorisation adaptée. La première phase de cette étude a permis d'établir une cartographie des gisements de déchets plastiques générés, et non ou mal valorisés en France par typologie de résines et par secteurs.

A noter cependant qu'il est possible que les gisements de plastique présentés comme disponibles ne soient pas « purs » mais qu'ils soient inclus dans des quantités plus larges, en mélange avec d'autres matériaux. La possibilité d'accéder à la totalité des déchets plastiques dépend aussi de la capacité à améliorer les systèmes de collecte et la mise en place d'une chaîne de valeur au niveau national permettant de fournir des volumes suffisants et des qualités suffisamment élevées de déchets plastiques pour alimenter ces procédés. Les volumes de déchets potentiellement disponibles pour le recyclage chimique et physico-chimique seront donc, à court/moyen terme, inférieurs à ceux indiqués dans l'étude.

La seconde phase a permis d'identifier et d'examiner toutes les technologies disponibles pour traiter les flux de déchets identifiés et caractérisés en phase 1 de l'étude, afin de proposer des couples [gisements de déchets/technologies de recyclage chimique et physico-chimique] les plus pertinents pour le cas de la France selon leur niveau de maturité industrielle et de participation à la mise en place d'une économie circulaire au sens strict. Les différentes technologies ont leurs propres spécifications en termes de gisements de déchets acceptés et a plupart des procédés nécessitent toujours du tri et un prétraitement des déchets.

Une revue approfondie de la littérature et une quarantaine d'entretiens avec des experts, organisations professionnelles et développeurs de technologies de recyclage ont été effectuées afin de permettre la rédaction de cette étude.

ABSTRACT

Due to their functional properties and their applicability in many sectors, plastics are an extremely popular product in many industries. With 9.3% of the total demand on a European scale, France is the third most important consumer of plastics in the European Union in 2020. Additionally, plastics recycling plays an important role on a European level, notably within the ambition transcribed in the Directive N°2019/904 of June 5, 2019 on the reduction of the impact of certain plastic products on the environment, but also on a French level through the law on the fight against waste and for a circular economy (AGEC law), enacted on February 10, 2020. Through this law, France has set the ambitious target of 100% recycled plastics by 2025. In addition to this recycling target, there are goals on the integration of recycled raw materials.

Recycling in France is mainly mechanical. However, plastics used today are of diverse and varied natures, sometimes contaminated or complex to treat which directly impacts the quality of the secondary raw material produced when mechanical recycling is possible. Hence, these processes do not always allow to obtain all the properties that converters require for some applications.

Chemical and physicochemical recycling technologies are a complementary solution to mechanical recycling allowing to produce recycled resins with qualities comparable to those of virgin resins and are thus called to contribute to the improvement of the current recycling rates in order to favor the transition towards a circular economy in France.

In this context, this two-phase study aims to quantify the quantities of plastic waste that can be recovered in France in several sectors (WEEE, packaging, ELV, TLC, furniture, construction), and to analyze the most promising chemical and physico-chemical recycling methods to treat these quantities while waiting for a suitable recovery solution. The first phase of this study has enabled the mapping of the plastic waste generated and not or poorly recovered in France by type of resin and by sector.

A point a vigilance is that for plastics available is not always pure but can be mixed with other materials. Possibility to access the whole plastic waste need waste collection systems' improvements.

The second phase identified and examined all the technologies available to treat the waste streams identified and characterized in phase 1 of the study, in order to propose the most relevant pairs [waste deposits/chemical and physico-chemical recycling technologies] for the case of France, according to their level of industrial maturity and participation in the implementation of a circular economy in the strict sense.

Different technologies have the own specifications in term of intrants and most of them need a first phase of sorting and pretraitement of waste.

An in-depth review of the literature and about 40 interviews with experts, professional organizations and developers of recycling technologies were conducted in order to enable the writing of this study.

1. Contexte du projet

En 2020, l'Union Européenne a été responsable de la production de 49,1 millions de tonnes de plastiques. Les principaux secteurs, pour lesquels cette matière est utilisée intensivement et générant ainsi une quantité importante de déchets plastiques, sont les secteurs de l'Emballage (ménagers, industriels & commerciaux - 40,5 %), du Bâtiment et de la construction (20,4 %), de l'Automobile (8,8 %), et des Équipements électriques et électroniques (6,2 %). En dépit de la popularité et de la praticité de ces matériaux, des problèmes persistent dans la gestion de leur fin de vie. Les difficultés rencontrées lors des phases de collecte, de tri et de recyclage font que les déchets plastiques sont incinérés, mis en décharge ou dispersés dans l'environnement. Par conséquent, seule une fraction minimale des plastiques mis en marché chaque année est envoyée au recyclage et réemployée avec succès.

À ce jour en Europe, plus de 99% des déchets en plastiques recyclés sont traités par recyclage mécanique. Le recyclage mécanique permet de transformer des déchets plastiques en matières premières secondaires, sans modifier de manière significative la structure chimique des matières plastiques traitées. Globalement, les procédés de recyclage mécanique consistent à ce que les déchets plastiques soient simplement collectés, triés, nettoyés, découpés en copeaux et refondus pour produire des granulés de plastiques. Malgré cette dynamique, la France affiche des taux de recyclage pouvant être encore largement améliorés. Cette technologie représente la seule solution de recyclage qui a été développée avec succès à l'échelle industrielle³. Cependant, celle-ci présente plusieurs limites :

- **Dégradation des plastiques** : parallèlement à la phase d'utilisation des plastiques, le procédé de recyclage mécanique contribue à affaiblir la structure des polymères. Plus une matière est recyclée, plus les liaisons qui existent entre ses molécules se dégradent, ce qui limite le nombre de fois où elle peut être recyclée efficacement²³.
- **Limite concernant les plastiques contaminés** : le recyclage mécanique ne permet pas d'éliminer les additifs et/ou les substances involontairement ajoutées qui sont fréquemment présentes dans les déchets plastiques.
- **Incapacité de traiter tous les déchets plastiques** : dans le cadre du recyclage mécanique, certains plastiques ne peuvent pas être recyclés, comme les plastiques thermodurcissables (e.g. les polyuréthanes - PUR), les emballages complexes multi-matières, etc.... Par ailleurs, le coût de l'ensemble des opérations de recyclage limite aussi leur traitement.
- **Tri** : le recyclage mécanique nécessite un flux de plastiques homogène, trié avec un haut niveau de pureté. Les technologies de tri évoluent mais les diverses organisations ne permettent pas de trier la totalité des plastiques.

Tous ces facteurs limitent donc considérablement la quantité de plastiques qui peut être efficacement traitée et ouvrent la porte à des approches permettant d'améliorer les taux de recyclage. Le recyclage chimique et physico-chimique émerge en tant que solution complémentaire pour combler des lacunes et permettre de recycler des plastiques pour lesquels il n'existe actuellement aucune solution de recyclage, ou qui sont mal valorisés par la voie mécanique. Le recyclage chimique et physico-chimique dispose en effet de plusieurs facteurs différenciants :

- Il permet de **décontaminer** le plastique recyclé en retirant tout additif ou substances indésirables, rendant le plastique réutilisable par exemple en théorie dans le cadre d'emballages alimentaires (sous réserve de validation par l'EFSA) ;
- Il ne cause **pas de vieillissement prématuré** de la structure des polymères ;
- Il permet d'augmenter potentiellement la capacité de recyclage à partir de **gisements non ou peu valorisés à ce jour** ;
- Selon la technologie utilisée, il permet d'obtenir, en sortie du recyclage, soit le plastique à l'état de **polymère**, soit les **monomères** qui le constituent.

En effet, le recyclage chimique et physico-chimique permet de recycler différents types de résines issus des déchets plastiques, notamment des plastiques auxquels adhèrent des résidus et autres substances ou additifs présents dans les déchets. Il convient donc de distinguer trois grandes catégories de recyclage chimique et physico-chimique : la **dissolution sélective**, la **dépolymérisation chimique**, et la **dépolymérisation thermique et craquage thermique**.

A l'aube du développement des nouvelles technologies de recyclage chimique et physico-chimique, il est important de souligner les problématiques inhérentes à leur maturité moins importantes en comparaison avec le recyclage mécanique. Ces risques sont de nature environnementale, réglementaire, économique, ou liée à la consommation.

2. Méthodologie de l'étude

Cette étude a été réalisée en trois phases.

2.1. Phase 1 – Identification des gisements de déchets pouvant être candidats aux différentes technologies de recyclage chimique et physico-chimique en France

L'identification des gisements de déchets plastiques pouvant être candidats aux différentes technologies de recyclage chimique et physico-chimique en France a été établie sur la base de plusieurs recherches bibliographiques exhaustives, et aussi grâce au recueil d'informations via l'organisation d'une dizaine d'entretiens avec des parties-prenantes spécialisées dans ces sujets (ONGs, éco-organismes, acteurs de la filière REP, etc.). Les données recueillies ont permis de quantifier les tonnages et de qualifier la composition des différents types de gisements issus des filières de DEEE, emballages (ménagers, industriels & commerciaux), plastiques agricoles, VHU, textiles (TLC), ameublement, bâtiment et revêtement de sol. En parallèle, des informations qualitatives ont aussi été rassemblées au sujet des défis existant au niveau de la collecte, du tri et du recyclage mécanique pour chacun des secteurs susmentionnés. Les résultats obtenus ont ensuite été analysés à partir de 6 critères bien définis qui permettent d'évaluer l'existence ou non d'un potentiel de valorisation par le biais du recyclage chimique et physico-chimique pour chacun des gisements, en tenant compte des éléments qualitatifs et quantitatifs recueillis (cf. ANNEXE I pour la description détaillée des 6 critères d'analyse). La principale limite rencontrée au cours de cet exercice a été le manque de données suffisamment précises au sujet de la multiplicité des grades par résine et additifs qui composent les gisements de déchets plastiques. Des estimations ont donc été réalisées lorsque cela était pertinent.

2.2. Phase 2 - Identification des technologies de recyclage chimique et physico-chimique applicables aux gisements identifiés en Phase 1

Comme pour la phase 1, une revue de la littérature bibliographique et une trentaine d'entretiens avec experts et développeurs de technologie ont permis de catégoriser les technologies de recyclage chimique et physico-chimique aptes à traiter les flux de déchets identifiés et caractérisés au volet précédent. Cet exercice a été effectué en considérant les nouvelles technologies existant sur un périmètre mondial, et dont le niveau de maturité correspondait à un TRL ≥ 5 (les TRL ont soit été confirmés par les développeurs de technologies eux-mêmes lors des entretiens effectués, soit estimés sur la base des informations disponibles publiquement). A l'issue de cette phase, une liste proposant des couples [gisement de déchets plastique / technologie de recyclage chimique et physico-chimique] pour les différents secteurs étudiés et pertinents dans le cas de la France a été définie.

2.3. Phase 3 – Evaluation des couples [gisement-technologie]

Les phases 1 et 2 de l'étude ont permis de lister 17 couples [gisement-technologie] identifiés comme valorisables par le biais du recyclage chimique et physico-chimique. Ces couples ont ensuite été évalués en fonction de leur niveau de « Circularité » et de leur « Faisabilité industrielle » (cf. ANNEXE II pour accéder aux détails des critères et sous-critères considérés pour cette évaluation).

La « Circularité du processus » fait référence à la capacité de la technologie à permettre de réutiliser les plastiques recyclés en boucle fermée, tout en assurant un bon rendement et une qualité optimale. Les technologies ayant un score de circularité élevé sont à privilégier car elles sont plus efficaces par rapport aux autres types de recyclage qui entraîneraient soit un « downcycling » des déchets plastiques recyclés, soit une nécessité d'inclure plusieurs étapes de post-traitement avant d'obtenir le plastique sous sa forme finale pour une utilisation directe par les plasturgistes, soit la production d'une portion élevée de produits sortants non-destinés à des applications plastiques (à des fins de production de carburant par exemple).

Ensuite, des questions ont été posées sur la « Faisabilité industrielle » de chaque couple. Bien qu'une technologie de recyclage obtienne un score élevé en matière de circularité, elle peut être moins mature que d'autres processus. De la même manière, le système de collecte du gisement traité par une solution de recyclage peut ne pas encore être suffisamment efficace ou déployé. De plus, il est possible qu'il n'y ait pas de projets en cours au niveau national français, ce qui implique que la technologie devra être importée ou que les déchets devront être exportés vers d'autres pays pour être recyclés. Par conséquent,

le critère de faisabilité industrielle est utilisé comme un indicateur de la maturité globale de la chaîne de valeur.

L'évaluation des couples [gisement-technologie] sur la base de ces critères a donc permis de finaliser l'étude en identifiant les gisements de déchets plastiques pouvant être traités par recyclage chimique et physico-chimique en France.

3. Quantification des gisements de déchets plastiques pour lesquels une solution de recyclage est recherchée

Cette section du rapport analyse selon une approche sectorielle les différents flux de déchets plastiques issus des EEE, emballages (ménagers, industriels et commerciaux, agricoles), VHU, textile (TLC), ameublement (DEA), bâtiment et revêtements de sol. A cette fin, la terminologie ci-après a été utilisée :

- Gisement de déchets plastiques disponible = Gisement total de déchets plastiques générés prenant en considération les mises en marché historiques et les durées de vie (gisements collectés + non-collectés) ;
- Gisement collecté = Gisement de déchets collectés avant la phase de tri ;
- Gisement ou tonnage non-collecté = Gisement total de déchets plastiques générés – Tonnage collecté ;
- Gisement ou tonnage non-recyclé = Gisement total de déchets plastiques générés – Tonnage recyclé mécaniquement ;
- En ce qui concerne les autres voies de valorisations du type incinération et CSR, la valorisation énergétique peut pour certains gisements inclure la partie revalorisée en CSR (e.g. secteur textile, et EEE). En effet, le détail quantitatif des voies de valorisation par secteur et par résine n'étant pas disponible du tout, ou du moins selon ce découpage, il n'a pas été possible de distinguer la part exacte de déchets plastique revalorisé en CSR en raison du manque de données détaillées sur les tonnages traités par cette voie de valorisation.

L'étude réalisée montre que sur 3,5 millions de tonnes de déchets générés en France en 2019, plus de 70% n'ont pas été recyclés mécaniquement, soit car non recyclables par cette voie, soit car ils n'ont pas été collectés. Les deux diagrammes à bulles ci-dessous (Figure 1 et la Figure 2) montrent clairement que les **déchets d'emballages** constituent les plus gros volumes en termes de génération de déchets plastiques et de tonnage non-recyclé à ce jour.



Figure 1 : Gisement de déchets plastique total généré en 2019 en France (par secteur et type de résine)

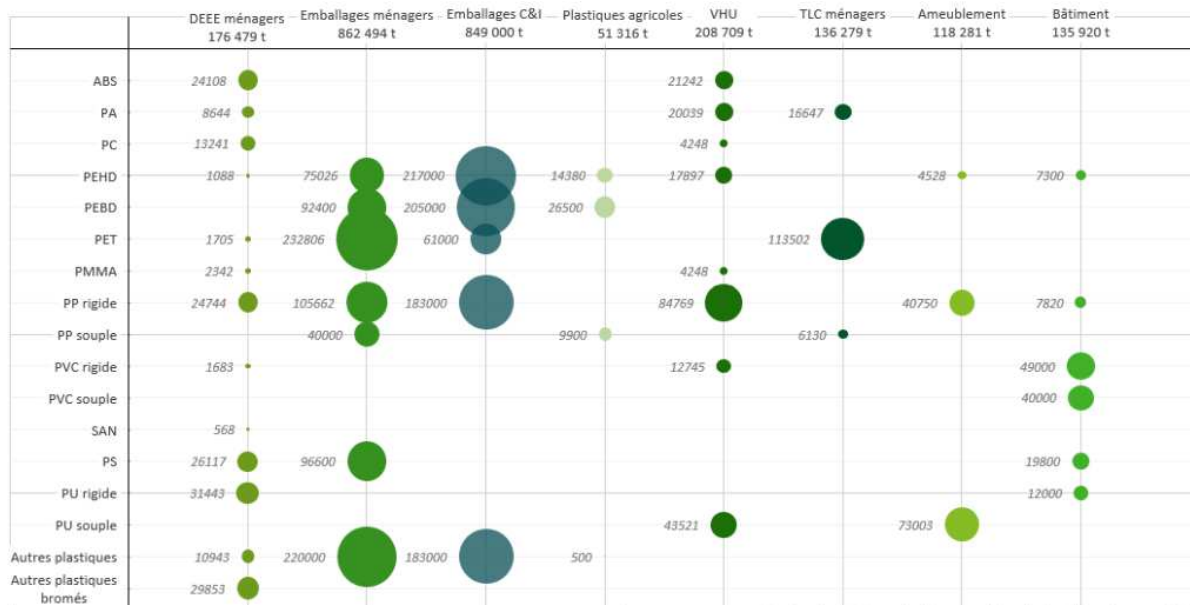


Figure 2 : Plastique non-recyclés mécaniquement (incluant les tonnages non-collectés et sans considérer les déchets réutilisés) en France en 2019, par secteur et type de résineⁱ

La quantité élevée de déchets plastiques non-recyclés mécaniquement constitue un argument valable pour explorer la possibilité d'utiliser des solutions de recyclage chimique et physico-chimique pour aider à augmenter les taux de recyclage nationaux. Toutefois, les quantités de plastiques indiquées dans la Figure 2 comprennent les plastiques qui ne sont pas collectés ainsi que ceux qui sont collectés mais non recyclés mécaniquement. Par conséquent, la possibilité d'accéder à la totalité de ces déchets plastiques dépend de la capacité à améliorer les systèmes de collecte et la mise en place d'une chaîne de valeur au niveau national permettant de fournir des volumes suffisants et des qualités suffisamment élevées de déchets plastiques pour alimenter ces procédés. Les volumes de déchets potentiellement disponibles pour le recyclage chimique et physico-chimique seront donc, à court/moyen terme, inférieurs à ceux indiqués dans la figure.

3.1. Plastiques issus des Déchets d'Équipements Électroniques et Electroniques (DEEE)

Tableau 1 : DEEE - Evaluation des déchets à fort potentiel pour les technologies de recyclage chimique et physico-chimique

		Gisement important ? (0kt ≤ 10kt ≤ 40kt)	Collecte	Tri	Filière recyclage mécanique bien établie ?	Même usage ?	Existence d'une demande en MPR pour même usage ?
DEEE	Potentiel de valorisation par recyclage chimique	PC	~	✓	✗	✗	ND
		PU rigide	~	✓	✗	✗	✓
		Plastiques bromés (dont PP et ABS)	~	✓	✗	✗	ND
		PA, PET, PMMA, POM, PVC Rigide, SAN, ABS-PC, Autres plastiques	✗	✓	✗	✗	ND
	Recyclage mécanique bien installé	ABS	✓	✓	✓	✓	✓
		PEHD	✗	✓	✓	✓	✓
		PP rigide	✓	✓	✓	✓	✓
		PS / HIPS	✓	✓	✓	✓	✓

Le secteur des DEEE est très complexe à analyser en raison des nombreux défis de traçabilité, de collecte, et de recyclage de ces appareils. Il est estimé qu'un gisement plastique d'environ 228 000 tonnes de déchets est généré chaque année par ce secteur. Sur la base de ce tonnage total, environ 56 % est collecté et 23 % est recyclé mécaniquement. Pour la filière DEEE, les trois résines pour lesquelles il a été identifié

ⁱ Cette figure ne prend en compte ni les tonnages de TLC ménagers réutilisés, ni ceux des VHUs réutilisés car cette fin de vie est considérée plus vertueuse que le recyclage.

un fort potentiel de valorisation par le biais du recyclage chimique et physico-chimique, sont le **PC**, le **PU** rigide, et les **plastiques bromés** qui contiennent notamment du PP et de l'ABS. Les gisements générés par ce secteur pour ces trois polymères ne sont pas négligeables et se retrouvent dans les flux collectés, mais ne sont aujourd'hui pas recyclés par le biais du recyclage mécanique. Le recyclage chimique et physico-chimique pourrait aussi **certaines fractions résiduelles** après la récupération des résines d'intérêt déjà bien recyclées mécaniquement (c'est-à-dire le PP, l'ABS, et le PS/HIPS). Les **PA, PET, PMMA, POM, PVC Rigide, SAN**, se retrouvent également dans les fractions plastiques des DEEE et ce souvent en très bonne qualité, mais en raison du fait qu'ils sont présents en de trop faibles quantités et très dispersés dans les flux, il ne serait pas suffisamment rentable/viable économiquement de les récupérer avec les technologies de tri actuelles. Il est possible que dans les années à venir cette situation s'améliore grâce aux études menées par des éco-organismes sur la qualification des matrices composant tous les flux de plastiques de DEEE.

3.2. Plastiques issus des emballages ménagers

Tableau 2 : Emballages ménagers - Evaluation des déchets à fort potentiel pour les technologies de recyclage

		Gisement important ? (0kt ≤ 10kt ≤ 40kt)	Collecte	Tri	Filière recyclage mécanique bien établie ?	Même usage ?	Existence d'une demande en MPR pour même usage ?
Emballages (ménagers) Potentiel de valorisation par recyclage chimique Recyclage mécanique bien installé	PET coloré	✓	✓	✓	✓	✗	✓
	PET opaque, multicouche, barquettes	✓	~	✗	✗	✗	✓
	PEBD	✓	~	~	✓ / ~	✗	✓
	PP souple	✓	~	✗	✗	✗	✓
	PS	✓	~	✗	~	✗	✓
	Autres plastiques	✓	~	✗	✗	✗	✗
	PET clair (bouteille)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	PEHD *	✓	✓	✓	✓	✗	✓
	PP rigide *	✓	~	✓	✓	✗	✓
	chimique et physico-chimique						

Le marché des emballages ménagers a été responsable de la production de 1 189 kt de déchets plastiques en 2020. Sur ce volume, seulement 40 % des emballages ont été collectés, et moins de 30 % ont été recyclés. Le principal défi de ce secteur est lié à la difficulté de collecter les déchets en raison d'un mauvais geste de tri de l'habitant. En considérant à la fois les quantités de déchets non-collectés et ceux qui ne sont pas recyclés mécaniquement, le total annuel des déchets non-recyclés s'élève à 863 kt. Les **bouteilles et flacons en PET clair** issus sont aujourd'hui déjà bien recyclés mécaniquement en boucle fermée et le PET recyclé à partir de ce gisement est déjà apte au contact alimentaire. A l'inverse, le **PET coloré, opaque, et emballages multicouches** ne sont soit pas du tout recyclés mécaniquement (e.g. PET opaque, barquettes multicouches), soit ils le sont mais pour des applications en boucle ouverte (e.g. PET coloré recyclé pour en faire des fibres textiles notamment réutilisées dans le secteur du bâtiment et des TLC). Le **PS** et le **PP souple** ne sont pas suffisamment recyclés en raison des trop faibles volumes collectés et triés, mais aussi en raison des coûts importants que demande l'accès à ces gisements. Par ailleurs, comme le recyclage mécanique du **PS** n'est pas forcément adapté pour obtenir une matière recyclée suffisamment de bonne qualité, le recyclage chimique ou physico-chimique semble être la voie la plus appropriée. Dans le cas des emballages ménagers, le fait que les tonnages « non collectés » basculent en « collectés » grâce à l'amélioration du système de collecte, ne veut pas toujours dire que ces plastiques seront disponibles pour le recyclage chimique. Par exemple, si le taux de collecte des bouteilles et flacons en PET clair augmente, cela devrait permettre d'augmenter les tonnages orientés en recyclage mécanique avec retour au contact alimentaire. Ou encore, pour certains emballages comme les barquettes mono-PET (très peu collectés en 2020), Indorama/Valorplast ont récemment annoncé avoir mis au point un procédé de recyclage mécanique avec retour à la barquette.

3.3. Plastiques issus des emballages industriels et commerciaux

Tableau 3 : Emballages Commerciaux et Industriels - Evaluation des déchets à fort potentiel pour les technologies de recyclage chimique et physico-chimique

Emballages (c&u)		Gisement important ? (0kt ≤ 10kt ≤ 40kt)	Collecte	Tri	Filière recyclage mécanique bien établie ?	Même usage ?	Existence d'une demande en MPR pour même usage?
Potentiel de valorisation par recyclage chimique Recyclage mécanique bien installé	PET opaque, multicouche, barquettes	✓	~	ND	ND	✗	✓
	PET coloré	✓	~	ND	ND	~	✓
	PEBD	✓	✓	ND	ND	~	✓
	PET clair *	✓	~	ND	ND	~	✓
	PEHD *	✓	~	ND	ND	~	✓
	PP rigide *	✓	~	ND	ND	~	✓
	Autres plastiques	✓	~	✗	✗	✗	✗

Avec une mise sur le marché total de 1 208 kt de plastiques par an, le secteur des emballages industriels et commerciaux est l'un des plus importants en termes de production annuelle en volumes de déchets plastiques. Pourtant, ce secteur souffre de l'absence d'un système efficace de traçabilité et de collecte des déchets. Les plastiques non-recyclés et non-collectés s'élèvent à un total de 850 kt de plastiques. Cette tendance devrait cependant s'améliorer dans les années à venir, grâce à la mise en place d'une filière REP pour le secteur (d'ici 2025). Tout comme la filière emballages ménagers, le **PEBD**, **PET coloré**, **opaque**, et **emballages multicouches** ont été identifiés comme des gisements ayant un bon potentiel de revalorisation par le biais du recyclage chimique/physico-chimique. Aussi, une partie de **PET clair**, **PEHD** et **PP rigide** pourrait être redirigée vers ces filières pour faire face à la présence élevée de contaminants dangereux et d'impuretés dans ces gisements, et ainsi réussir à obtenir du PE, PP et PET recyclés de qualités supérieures et aptes au contact alimentaire qui pourront être réutilisés dans des applications à plus hautes valeurs ajoutées (du type emballages alimentaires, voire pharmaceutiques).

3.4. Plastiques agricoles

Tableau 4 : Plastiques agricoles - Evaluation des déchets à fort potentiel pour les technologies de recyclage chimique et physico-chimique

Plastiques agricoles		Gisement important ? (0kt ≤ 10kt ≤ 40kt)	Collecte	Tri	Filière recyclage mécanique bien établie ?	Même usage ?	Existence d'une demande en MPR pour même usage?
Recyclage mécanique bien installé	PEHD *	~	✓	✓	✓	~	✓
	PEBD *	✓	✓	✓	✓	~	✓
	PP souple *	~	~	✓	✓	~	✓
	Autres plastiques	✗	✓	✓	✗	✗	✗

Le secteur des plastiques agricoles est responsable de la production de 117 kt de déchets par an, dont seulement 56 % sont actuellement recyclés. Les plastiques agricoles en **PP souple** sont moins bien collectés par rapport au **PEHD** et au **PEBD**, mais ces trois résines sont tout de même déjà majoritairement bien recyclées mécaniquement aujourd'hui, à l'exception de certaines catégories de produits en PEBD par exemple pouvant présenter des taux de souillures élevés. Ces matériaux sont en revanche **majoritairement recyclés en boucle ouverte pour d'autres applications à moindre valeur ajoutée**, et une partie pourrait être recyclée chimiquement/physico-chimiquement afin d'améliorer les propriétés mécaniques, esthétiques et chimiques des matières recyclées pour permettre une utilisation dans des applications à plus haute valeur ajoutée s'il existe un besoin et que l'équation économique le permet.

3.5. Plastiques issus des Véhicules Hors d'Usage (VHU)

Tableau 5 : VHU - Evaluation des déchets à fort potentiel pour les technologies de recyclage chimique et physico-chimique

VHU		Gisement important ? (0kt ≤ 10kt ≤ 40kt)	Collecte	Tri	Filière recyclage mécanique bien établie ?	Même usage ?	Existence d'une demande en MPR pour même usage?
Potentiel de valorisation par recyclage chimique Recyclage mécanique bien installé	PU souple	✓	✓	✗	✗	✗	✓
	PEHD	~	✓	✓	~	✗	✓
	ABS, PA	~	✓	~	✗	✗	ND
	PC, PMMA	✗	~	~	✗	✗	ND
	PP rigide	✓	✓	~	✓	✓	✓

Le gisement de déchets plastiques issu de la filière VHU a été estimé à 288 kt par an. Environ 70 % des plastiques mis en marchés sont collectés, ce qui montre que le système de collecte de ce secteur est efficace (en partie grâce à l'utilisation des primes à la caisse). Toutefois, la collecte peut toujours être améliorée, notamment pour prévenir les pertes des plastiques qui ne sont pas tracés ou qui sont dirigés vers des filières illégales. La meilleure façon de récupérer les plastiques issus des VHUs est de les démonter avant de les broyer. La plupart des plastiques démontés à ce stade sont réutilisés. Tous les plastiques qui restent sur les carcasses des VHUs sont livrés aux broyeurs. Il a été estimé qu'à ce jour seulement 23 % du gisement disponible est recyclé mécaniquement (principalement du PP). Les quantités de **PA, d'ABS, de PC et PMMA** se retrouvent souvent en mélange dans les voitures en de bien plus faibles quantités et cela se voit également dans le gisement disponible qui a été identifié dans les chapitres précédents. Pour cette raison, il n'a pas été identifié de potentiel de revalorisation par le biais du recyclage chimique/physico-chimique pour ces résines, au vu des volumes et de la demande en MPR difficile à évaluer.

3.6. Plastiques issus des Textiles (TLC) ménagers

Tableau 6 : Textile (TLC) - Evaluation des déchets à fort potentiel pour les technologies de recyclage chimique et physico-chimique

		Gisement important ? (0kt ≤ 10kt ≤ 40kt)	Collecte	Tri	Filière recyclage mécanique bien établie ?	Même usage ?	Existence d'une demande en MPR pour même usage ?
Textile	PET	✓	~	ND	~	~	✓
	PA	~	~	ND	✗	~	~
	PP souple	✗	~	ND	✗	~	ND

La manque de données exhaustives sur la filière rend compliquée l'estimation précise des quantités de plastique issues des TLC ménagers. Les données figurant dans cette section présentent un degré élevé d'incertitude en raison de l'absence d'informations publiques plus précises. De plus, il est possible que les gisements de plastique présentés comme disponibles ne soient pas « purs » mais qu'ils soient inclus dans des quantités plus larges, en mélange avec d'autres matériaux. Il a été estimé que le secteur de TLC ménagers engendre une production d'environ 188 kt de déchets plastiques par an. Seuls 38 % des plastiques issus de ce secteur sont collectés chaque année. Au-delà de la collecte, les défis liés au tri spécifiques à cette filière (aspect multi-matières, conception complexe, technologies de tri manuels et/ou rudimentaires, etc.) font que seuls 30 % de tous les plastiques disponibles sont triés. La complexité du gisement, les tendances à la réutilisation et au réemploi des textiles (meilleures solutions dans le cadre d'une économie circulaire), l'importance de l'export et le manque d'infrastructures sur le territoire français, amènent à un taux de recyclage de 10 % seulement. Compte tenu des barrières dans ce secteur, il est clair que des améliorations sont à apporter pour lever les freins au recyclage mécanique, ainsi qu'au recyclage chimique et physico-chimique (développement du tri, du déliassage, et des débouchées). En revanche, les technologies de recyclage chimique et physico-chimique pourraient permettre de partiellement s'affranchir de la contrainte multi-matières et de qualité de la fibre, et donc permettre le recyclage des résines majoritaires dans les TLC (notamment les déchets composés à 80% ou plus de **PET** ou **PA**).

3.7. Plastiques issus des Déchets d'Éléments d'Ameublement (DEA)

Tableau 7 : DEA - Evaluation des déchets à fort potentiel pour les technologies de recyclage chimique et physico-chimique

		Gisement important ? (0kt ≤ 10kt ≤ 40kt)	Collecte	Tri	Filière recyclage mécanique bien établie ?	Même usage ?	Existence d'une demande en MPR pour même usage ?
Ameublement	PU souple	✓	~	~	~	✗	✓
	PP rigide	✓	~	~	✗	✗	~
	PEHD	✗	~	~	✗	✗	~

La part de plastiques dans les déchets issus de l'ameublement est très faible et très peu étudiée. Celle-ci ne représente pas plus de 2% à 3% du gisement de DEA, soit environ 150 kt par an. La part de chacun des plastiques est inconnue. Néanmoins, le gisement est constitué principalement du **PU souple**, **PEBD**, et **PP souple**. Les déchets issus de ce secteur sont souvent difficiles à récupérer et à massifier. La collecte des déchets plastiques dans ce secteur a été estimée à 39 % du gisement disponible. Même si le recyclage mécanique de ces plastiques est techniquement possible, le gisement reste très dilué et complexe à

massifier. Une amélioration de la collecte et du tri sont nécessaires pour soutenir le recyclage. Une massification du gisement via un fonctionnement inter-filière pourrait sans doute permettre la massification de ces flux de plastiques issus de l'ameublement (notamment via une mutualisation mise en place avec des flux jouets, articles de sport et de bricolage qui sont principalement en PE/PP/PS/ABS), pour aussi bien permettre le recyclage mécanique que chimique/physico-chimique.

3.8. Plastiques issus du Bâtiment et revêtements de sol

Tableau 8 : Bâtiment (dont revêtements de sols) - Evaluation des déchets à fort potentiel pour les technologies de recyclage chimique et physico-chimique

		Gisement important ? (0kt ≤ 10kt ≤ 40kt)	Collecte	Tri	Filière recyclage mécanique bien établie ?	Même usage ?	Existence d'une demande en MPR pour même usage ?
Bâtiment	Potentiel de valorisation par recyclage chimique	PP rigide	×	ND	ND	×	ND
		PEHD	~	ND	ND	×	ND
		PSE	~	ND	ND	×	✓
		PU rigide	~	ND	ND	×	✓
	Recyclage mécanique bien installé	PVC souple *, PVC rigide *	✓	ND	~	~	✓
		ABS, PA, PMMA, Autres plastiques	×	ND	ND	×	ND

Environ 170 kt de déchets plastiques sont collectés chaque année dans le secteur de la construction et des revêtements de sols, cependant le secteur ne dispose pas encore d'une filière REP, ce qui rend la traçabilité des déchets issus de ce secteur difficile. Le recyclage mécanique du **PVC** existe et est déjà bien avancé (notamment pour le **PVC souple** utilisés pour les revêtements de sol issus des chutes de pose ou post-consommations sans phtalates). Cependant, le recyclage des autres résines est généralement entravé par l'absence de systèmes de collecte et de tri performants, ainsi que par la présence éventuelle de substances interdites dans le gisement. Le recyclage chimique serait envisageable principalement pour les gisements de faible qualité ou qui contiennent (ou peuvent contenir) des plastifiants ou autres substances et additifs (comme des retardateurs de flamme. Le recyclage chimique et physico-chimique pourrait être plus pertinent pour recycler les **PS/EPS** et **PU**.

4. Adéquation des technologies de recyclage chimique et physico-chimique aux gisements de déchets plastiques existants

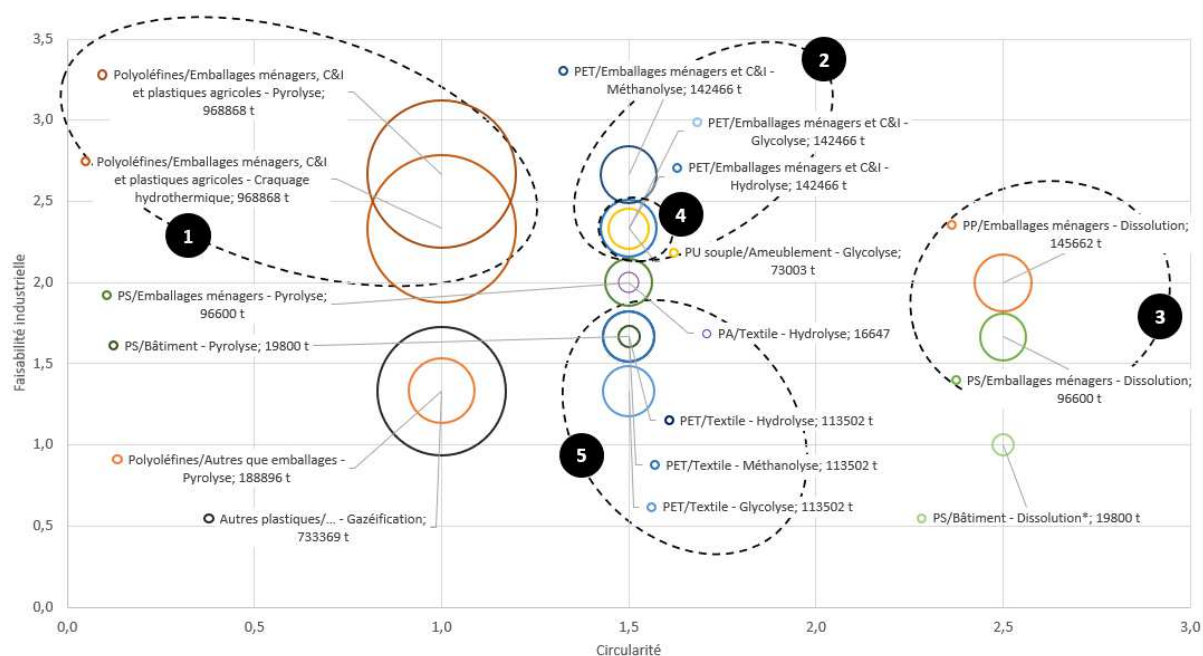


Figure 3 : Résultats de l'analyse des technologies de recyclage chimique-physico-chimiques applicables aux flux des déchets plastiques non-recyclés en France (Groupes 1, 2, 3, 4 et 5). (Légende Couples : Résine/Secteur – Technologie de recyclage chimique et physico-chimique – Tonnage gisement non-recyclé en France potentiel maximum car les gisements peuvent être en mélange et non collectés en totalité)

Les résultats de cette analyse ont permis de distinguer 5 regroupements de couples [gisements-technologies] principaux, qui représentent les technologies ayant les plus fortes dynamiques de développement aujourd'hui en France, selon les critères décrits en ANNEXE II. Ces 5 groupes identifiés mettent également en évidence les technologies de recyclage chimique et physico-chimique qui s'appliquent sur des gisements de déchets plastiques non-recyclés dont les volumes sont **les plus importants et dont le potentiel d'exploitation est relativement élevé**. Les autres couples [gisements-technologies] non-inclus dans ces 5 regroupements représentent également des couples [gisements-technologie] intéressants et susceptibles de se développer davantage dans un futur proche au vu de la singularité des gisements de déchets plastiques sur lesquels ils s'appliquent (PS/EPS issus du bâtiment, PA issu du textile, etc.), malgré des tonnages souvent plus faibles.

Les technologies de recyclage chimique et physico-chimiqueⁱⁱ **les plus développées aujourd'hui en Europe et en France** s'appliquent principalement **sur des gisements de déchets plastiques provenant de la filière emballage** (ménagers et commerciaux/industriels). En effet, **3 premiers groupes identifiés** (cf. Figure 3) se concentrent sur les gisements plastiques d'emballages non-recyclés ou difficilement recyclables par le biais du recyclage mécanique. Ceci peut notamment s'expliquer par un contexte réglementaire qui a très rapidement évolué dans ce secteur depuis 2018, créant ainsi une forte demande en plastiques recyclés de la part des marques et industriels qui ne cesse de croître, maintenant ainsi une forte dynamique de marché dans ce secteur (objectifs des directives européennes sur les déchets plastiques issus des emballages revus à la hausse et devenus plus contraignants, application de la Loi AGECE en France, engagements des marques dans le secteur de la boisson/agro-alimentaire/cosmétique à divers horizons proches, etc.). Les technologies de ces **3 premiers groupes** ciblant donc principalement les gisements de déchets plastiques issus des emballages sont aujourd'hui en cours de construction à des échelles variées et peuvent donc chacune avoir différents niveaux de maturité (TRL 6 à 9) notamment traduit par le critère de « Faisabilité industrielle ». Chacun de ces 3

ⁱⁱ Des travaux de normalisation sont en cours au niveau européen sur le « recyclage des plastiques et plastiques recyclés »

premiers groupes ont obtenu les moyennes les plus élevées sur au moins l'un des deux critères considérés dans l'analyse effectuée précédemment (« Faisabilité industrielle » x « Circularité du processus ») :

- Concernant les technologies de recyclage chimique identifiées dans le **Groupe 1** : les technologies de recyclage chimique identifiées ici ciblent également les gisements de déchets plastiques issus de la filière emballage (ménagers, C&I et agricoles), et plus particulièrement **les résines en polyoléfinés (PE, PP, PO)**, dont les tonnages des gisements non-recyclés en France s'élevaient en 2019 à **968 968 tonnes** au total. Les technologies de recyclage chimique recensées ici correspondent à des technologies de **pyrolyse** et de **craquage hydrothermique**. De la même façon que pour les technologies du Groupe 1, ces 2 types de technologies se distinguent en obtenant les plus hautes moyennes quant au critère de « Faisabilité industrielle » en raison de projets à **TRL élevés** (TRL 8 à 9), du déploiement de ces technologies de recyclage chimique **en Europe** (pour la technologie de craquage hydrothermique) et **en France** (pour les technologies de pyrolyse), et de **l'accessibilité à un gisement en PE, PP, PO disponible** grâce à des filières de collecte et de tri déjà **bien installées**. Cependant, bien que ces technologies de recyclage chimique sont aujourd'hui à un stade très avancé dans leur déploiement notamment en France, et que le gisement de déchets en polyoléfinés est déjà accessible et conséquent, il n'en reste pas moins que ces 2 technologies obtiennent une moyenne assez basse quant au critère de « Circularité du processus » en raison d'une part de rendements moins bons que d'autres technologies de recyclage chimique et physico-chimique en considérant les fractions obtenues en sortie des procédés de pyrolyse et non-utilisées pour refabriquer du plastique en bout de chaîne (comme du gaz de synthèse, noir de carbone, cendres), et d'autre part en raison de la nécessité d'inclure des étapes de post-traitement plus nombreuses que ce que requièrent les technologies de solvolysse ou de dissolution sélective afin d'obtenir les monomères et/ou polymères. Ces technologies de pyrolyse et de craquage hydrothermique ont en revanche le grand avantage de permettre la production de plastiques recyclés de qualité identique à du plastique vierge, du fait que ces technologies de craquage permettent de remonter aux réactifs/molécules les plus élémentaires et purifiés de toutes substances/additifs pour reproduire des monomères et polymères, tel qu'il est fait aujourd'hui dans la production de plastique pétro-sourcé. Les plastiques recyclés à partir de ces technologies-là peuvent donc être utilisés dans tout type d'application sans restriction particulières.
- Concernant les technologies de recyclage chimique identifiées dans le **Groupe 2** : Les 3 technologies mises en exergue ici font référence à des technologies de solvolysse, plus précisément de **méthanolyse**, de **glycolyse** et d'**hydrolyse**, toutes les **3 ciblant des gisements de déchets plastiques issus d'emballages en PET** (ménagers et C&I) dont le gisement non-recyclés en 2019 en France s'élevait à **142 466 tonnes**. Ces 3 types de technologies se distinguent en obtenant les plus hautes moyennes quant au critère de « Faisabilité industrielle » en raison de projets à **TRL élevés** (TRL 7 à 9), du déploiement de ces technologies de recyclage chimique **au sein même du territoire français**, et de **l'accessibilité à un gisement en PET disponible** grâce à des filières de collecte et de tri **bien installées**. Le score obtenu pour le critère de « Circularité du processus » est quant à lui situé dans la moyenne en raison de technologies de recyclage chimique offrant de **bons rendements de production de produits sortants** ([80% ; 95%]), **sans avoir à passer par de multiples étapes de post-traitements des produits** pour obtenir le PET recyclé in fine hormis la repolymérisation des monomères en polymères, et permettant une **utilisation du PET recyclé en boucle fermée** sans modification/dégradation des propriétés mécaniques, chimiques et esthétiques de la matière recyclée obtenue et suffisamment purifiée de potentielles substances ou additifs initialement présents dans le gisement de déchets en PET.
- Concernant les technologies de recyclage chimique identifiées dans le **Groupe 3** : Les technologies de recyclage identifiées dans ce regroupement correspondent aux technologies de dissolution sélective. Ce type de technologie de recyclage physico-chimique a été dérivée de deux types de gisements toujours issus du secteur emballages (ménagers) comme mentionné précédemment, qui sont les **gisements en PP et en PS**, dont les tonnages non-recyclés en France en 2019 s'élèvent respectivement à **145 662 tonnes** et **96 600 tonnes**. Ces technologies de dissolution sélective sont celles qui obtiennent la plus haute moyenne sur le critère de « Circularité du processus » s'expliquant par le fait qu'elles obtiennent souvent de hauts rendements pour la production de plastique recyclé, et qu'aucune étapes supplémentaire en sortie du procédé de dissolution est nécessaire pour obtenir le plastique recyclé in fine (polymère obtenu en sortie, à l'inverse des deux autres technologies susmentionnées obtenant soit des monomères, fractions d'hydrocarbures). Ces technologies sont par ailleurs aptes pour fonctionner en boucle fermée. En revanche, en termes de « Faisabilité industrielles », ces technologies de recyclage par dissolution sélective obtiennent toutes deux des moyennes plus basses que celles des Groupes 1 et 2 identifiés précédemment, en raison principalement du **niveau de maturité de ces technologies qui est inférieur à celui des technologies de solvolysse et de pyrolyse** implantées en France aujourd'hui et à horizon 2025 (TRL 6 à 7). En effet, malgré l'existence de projet en Europe à horizon 2025 à minima d'une part, et une accessibilité à un gisement plus aisé que pour d'autres filières de déchets d'autre part (gisement important accessible et suffisamment trié à date pour le PP, et filière de collecte existantes avec

des flux partiellement triés pour le PS), ces technologies de dissolution sélective ne se développent pas encore à échelle commerciale en France et sont aussi moins présentes que les autres technologies.

Les deux derniers regroupements effectués (**Groupes 4 et 5**) recensent des technologies de recyclage chimique et physico-chimique qui ont la spécificité de s'attaquer à des gisements de déchets plastiques différents des trois premiers groupes identifiés, c'est-à-dire autres qu'issus des filières de déchets d'emballages :

- Au sujet de la technologie de recyclage chimique identifiée dans le **Groupe 4** : Ce groupe à la particularité de n'inclure qu'une seule technologie de **glycolyse** développée par un seul développeur de technologie et qui s'applique **aux polyuréthanes (PU) issus des déchets de la filière ameublement**. Le gisement de PU non-recyclé issu de la filière ameublement en France a été estimé à **73 003 tonnes de PU** en 2019. Cette technologie ayant un niveau de maturité avancé sur le développement de la technologie (TRL 8), elle obtient une bonne moyenne à la fois en termes de « Faisabilité industrielle » et de « Circularité du processus », pour les mêmes raisons qui s'appliquent aux technologies de solvolyse du Groupe 1, à la seule différence que la filière d'où sont issues ces gisements de déchets en PU doit encore s'organiser afin que les flux PU collectés soient **davantage systématiquement triés**.
- En ce qui concerne les technologies de recyclage chimiques identifiées dans le **Groupe 5** : Les technologies qui se retrouvent dans ce dernier regroupement sont les mêmes technologies de solvolyse identifiées dans le Groupe 1 (méthanolyse, glycolyse et hydrolyse) mais qui s'appliquent cette-fois sur des **gisements de déchets PET/polyester issus de la filière textile**. Les tonnages de gisements non-recyclés en polyester en France en 2019 s'élevaient à **113 502 tonnes**, tout en sachant que les fibres polyesters se retrouvent souvent en mélange avec d'autres matières sur un même article. Tout comme les technologies du Groupe 1, le score obtenu pour le critère de « Circularité du processus » est situé dans la moyenne en raison de **bons rendements de production de produits sortants** ([80% ; 95%]), **sans avoir à passer par de multiples étapes de post-traitements des produits** (les monomères) pour obtenir le PET recyclé in fine hormis la repolymérisation des monomères en polymères. Ces technologies permettent également une **utilisation du PET recyclé en boucle fermée** sans modification/dégradation des propriétés mécaniques, chimiques et esthétiques de la matière recyclée obtenue et suffisamment purifiée de potentielles substances ou additifs initialement présents dans le gisement de déchets en fibres polyesters. La principale différence avec les technologies du groupe 1 (hormis le gisement ciblé) va surtout résider dans le niveau de maturité/ de praticabilité de la filière de collecte et de tri existantes pour accélérer le déploiement de ces technologies. En effet, bien qu'une partie de ces gisements textiles soient collectées, les étapes de tri ne sont pas aussi automatisées et matures que ce qui est aujourd'hui mis en place dans la filière emballages ménagers. Ainsi, il est encore difficile aujourd'hui de s'approvisionner en gisement textile principalement constitué de polyester en raison de l'aspect multi-matières des articles, et de la filière qui n'est pas encore en mesure de trier les déchets textiles selon une certaine contenance en polyester.

Comme mentionné au tout début de cette partie, les couples gisements-technologies non-inclus dans ces 5 premiers groupes représentent également des solutions pertinentes et émergentes qui se distinguent notamment par les types de gisements sur lesquels ils s'appliquent. Parmi ces couples, on retrouve :

→ **Technologies de dépolymérisation thermique (pyrolyse et gazéification) :**

- o PS issu du bâtiment traités via **pyrolyse** (tonnage non-recyclé en France en 2019 = **19 800 tonnes**)
- o PS issu des emballages ménagers traités via **pyrolyse** (tonnage non-recyclé en France en 2019 = **96 600 tonnes**)
- o Polyoléfines en mutualisant les flux issus d'autres secteurs que celui de l'emballages, c'est-à-dire les flux polyoléfines des DEEE, VHU, DEA, et Bâtiment, traités via **pyrolyse** (tonnage non-recyclé en France en 2019 = **188 896 tonnes**)
- o Autres plastiques (plastiques en mélanges majoritairement) traités via la **gazéification** ⁱⁱⁱ (tonnage non-recyclé en France en 2019 = **733 369 tonnes**)

→ **Technologies de dépolymérisation chimique (solvolyse) :**

ⁱⁱⁱ Un complément pourrait être ajouté pour l'analyse de la gazéification en alcools qui pourrait permettre de traiter d'autres gisements que les mélanges d'autres plastiques.

- o PA issu des TLC traités via **hydrolyse** (tonnage non-recyclé en France en 2019 = **16 647 tonnes**)
- **Technologie de dissolution sélective :**
- o PS/PSE issu des bâtiments traités via **dissolution sélective** (tonnage non-recyclé en France en 2019 = **19 800 tonnes**), notamment exclusivement de l'EPS pour l'un des développeurs de technologies identifié pour ce couple^{iv}.

Points d'attention à considérer à la lecture de cette analyse :

- Derrière chaque couple gisement-technologie se trouvent plusieurs développeurs de technologies. Le nombre total de développeurs de technologie par couple peut différer selon les technologies considérées (cf. ANNEXE III pour la liste complète des développeurs de technologies incluses dans l'étude) ;
- Les TRL indiqués ont pour certains été confirmés par les développeurs de technologies eux-mêmes lors d'entretiens effectués au cours de cette étude (20 au total), et le reste a été estimé sur la base des informations disponibles publiquement ;
- En raison d'un manque de données suffisamment précises au sujet de la multiplicité des grades par résine et additifs qui composent les gisements de déchets plastiques d'une part, et concernant également les spécifications techniques des flux traités par les technologies de recyclage chimique/physico-chimique ayant été analysées d'autre part, il n'a pas été possible d'effectuer des recommandations poussées sur les potentiels gisements qu'il est possible de mutualiser entre filières pour alimenter les différents procédés de recyclage chimique et physico-chimique en France. La seule mutualisation de gisement potentiellement envisageable et identifiée dans la Figure 3 est représentée par le couple *[Polyoléfines / Secteurs autres qu'emballages - Pyrolyse]*, où une mutualisation des gisements de déchets plastiques provenant des secteurs VHU, DEEE, Ameublement et Bâtiment est à évaluer.

^{iv} Ce couple incluait la technologie mise en œuvre par Polystyreneloop, qui visait spécifiquement les déchets EPS produits par le secteur du bâtiment. Il a été récemment annoncé que le projet a été arrêté en raison du manque de financement. Le couple a toutefois été maintenu dans la liste car il n'est pas exclu que le projet qui se situe en Europe reçoive de nouveaux financements à l'avenir ou que la technologie soit rachetée et utilisée par une autre entreprise.

CONCLUSIONS / PERSPECTIVES

Développement du recyclage chimique et physico-chimique en France et en Europe

- Les technologies de recyclage chimique et physico-chimique les plus matures et pour lesquelles des gisements existent en volumes importants aujourd'hui en France sont les technologies de de solvolysse (2), de dissolution (3) et de pyrolyse (1) (la pyrolyse a cependant un plus faible indicateur de circularité), qui s'appliquent principalement sur des gisements de déchets plastiques provenant de la filière emballage (ménagers et commerciaux/industriels), notamment les polyoléfinés (1) & (3), et le PET (2). Ces 3 premiers groupes recensent des couples pour lesquels les gisements existants sont importants, et qui semblent bien adaptées aux technologies de recyclage identifiées au vu de la faisabilité industrielle élevée. Les couples identifiés dans les groupes (4) et (5) sont aussi des technologies prometteuses avec de forts potentiels de développement en France en raison de très bonnes adéquations gisement/technologie, même si les gisements peuvent être plus faibles que les gisements issus des secteurs emballages (PU-ameublement), ou que l'organisation des filières de collecte/traitement a encore besoin d'être améliorée à ce stade pour accéder facilement aux gisements ciblés (PU-ameublement; Polyester-textile).
- Le développement du recyclage chimique/physico-chimique dépend fortement du marché, des débouchés, et de la demande en MPR par résine d'un certain niveau de qualité (propriétés mécaniques/esthétiques/chimiques), notamment impulsée par les différents objectifs européens et nationaux instaurés en matière de taux de recyclage et d'incorporation en MPR.

Compétition recyclage mécanique et chimique/physico-chimique

- Selon les développeurs de technologie, une compétition entre recyclage mécanique et recyclage chimique/physico-chimique semble peu probable, étant donné qu'ils **ciblent principalement des gisements non-recyclés ou difficilement recyclables** par le biais du recyclage mécanique (comme par exemple le PET coloré qui n'est pas bien recyclé mécaniquement). Toutefois, il n'est pas exclu que des gisements aujourd'hui recyclés mécaniquement soient ciblés pour l'approvisionnement de certaines usines de taille significative, notamment dans les phases de démarrage des usines de recyclage chimique.
- Le recyclage mécanique restera préférable quand envisageable, et la complémentarité entre le recyclage mécanique et chimique évoluera dans le temps en fonction des **évolutions technologiques des deux, de la qualité de la collecte et du tri, du comportement des consommateurs**, et des dynamiques de marché.
- La **dynamique de marché** devrait naturellement orienter les flux de déchets plastiques disponibles et non-recyclés (dont les plastiques non collectés à ce jour) vers les solutions de revalorisation qui seront à la fois **les plus compétitives et les plus aptes à répondre aux besoins spécifiques en MPR, en termes de qualité et de quantité**. En effet, dans les situations où le recyclage mécanique existe et est adapté à la demande en MPR pour une qualité spécifique, **le recyclage mécanique sera forcément la solution la plus compétitive par rapport aux technologies de recyclage chimique**. Si par ailleurs les filières de recyclage mécanique sont **saturées ou ne sont pas matures**, ou alors si le recyclage mécanique ne permet pas d'atteindre une qualité suffisamment élevée de la matière recyclée ^v, le recyclage chimique pourrait absorber certains de ces flux (à condition que les autres voies de valorisation du type CSR ne soient pas plus compétitives, ou moins impactantes d'un point de vue environnemental ^{vi}). Certaines parties-prenantes considèrent qu'un risque de concurrence sur certains gisements n'est pas à exclure.
- Le choix entre recyclage mécanique et chimique/physico-chimique pour le traitement de différents gisements sera principalement déterminé par : **(1) La qualité de la collecte et du tri**

^v Pour rappel, le recyclage mécanique ne permet pas d'avoir une qualité équivalente à de la matière vierge du fait de la multiplicité des grades. Étant donné que les applications de faible qualité peuvent être saturées il est nécessaire d'utiliser de la matière de qualité « vierge ».

^{vi} Il faut en effet souligner que le recyclage chimique pourrait également entrer en concurrence avec des solutions de fin de vie autres que le recyclage mécanique, comme le CSR par exemple.

effectués en amont ; (2) La présence d'impuretés, de substances héritées et différentes résines dans le gisement ; (3) La qualité souhaitée du produit de sortie (e.g. grade alimentaire).

Accès au gisement et préparation

- Malgré la promesse d'un recyclage chimique/physico-chimique permissif, les **différentes technologies ont leurs propres spécifications en termes de gisements de déchets acceptés**. En effet, la plupart des procédés nécessitent toujours du tri et un prétraitement des déchets en entrée **qui pourrait être équivalent** à ce qui est fait dans le cas du recyclage mécanique. La décision de savoir vers quels types de recyclage réorienter les flux triés **dépendra d'un compromis économique et environnemental**, etc.
- Pour la filière emballages ménagers, **le rôle de CITEO évolue**. L'éco-organisme est désormais repreneur d'une partie des flux (flux développement) **avec l'objectif de développer les filières de recyclage des emballages en plastiques** en particulier les technologies de recyclage chimique. Certains acteurs pointent un risque de difficulté d'approvisionnement pour certains recycleurs mécaniques (notamment pour les films PE/PP, PE/PP rigide et emballages PET colorés)^{vii}.
- Bien qu'une quantité élevée de plastiques devienne des déchets chaque année, plusieurs défis subsistent au niveau de la collecte. Par conséquent, le développement à une large échelle des technologies de recyclage chimique et physico-chimique nécessitera également l'amélioration des systèmes de collecte existants.

Evaluations environnementales

- La méthode ACV est essentielle pour comparer les technologies de recyclage entre-elles. Malgré tout, les méthodologies appliquées ne sont pas encore suffisamment matures ou bien utilisées pour le cas du recyclage chimique et elles ne peuvent pas devenir la seule manière d'évaluer des technologies différentes. Il faudrait donc à ce stade considérer les résultats obtenus comme des estimations générales et non pas comme le seul juge de paix pour prendre des décisions. Il est par ailleurs important de prendre en considération les catégories d'impacts environnementaux autres que les émissions CO₂ (impacts sur la biodiversité, etc.).
- Il est aussi nécessaire d'établir une méthode commune qui permette de mieux comptabiliser les réels impacts sur toutes les étapes de pré-traitement et de purification, jusqu'à la production de la matière recyclée (doit être pris dans le contexte globale de la chaîne de valeur et non uniquement au niveau individuel de la technologie)
- A noter que la prise en compte des émissions évitées contribue de manière significative aux bénéfices environnementaux du recyclage chimique. Cette approche fait débat du fait des incertitudes quant à certaines valeurs admises issues de bases de données.
- Les comparaisons des résultats d'impact environnementaux entre le recyclage mécanique et le recyclage chimique doivent se faire en gardant à l'esprit que les produits de sortie sont de différentes natures et de qualités variables (différentes unités fonctionnelles). Pour que l'analyse environnementale soit comparable, il faut sélectionner des produits de sortie de même nature et avec des propriétés similaires.

Réglementation

- Un défi du recyclage chimique est la **reconnaissance de ces technologies comme du recyclage contribuant à l'atteinte des objectifs réglementaires**. Aujourd'hui au niveau européen et national, certaines parties-prenantes (notamment les ONGs) appellent à une priorisation des techniques de recyclage **sur la base de leur empreinte environnementale**. Par ailleurs, la définition récente du terme « recyclage » dans le Décret Information du Consommateur (no 2022-748 du 29 avril 2022) indique que la matière recyclée produite par les processus de recyclage mis en œuvre doit représenter plus de 50 % en masse du déchet collecté¹. Les modalités retenues pour le calcul de ce taux, ainsi que la nature du procédé de recyclage utilisé,

^{vii} L'attribution des tonnages issus du tri du flux développement est cadrée par la réglementation - voir l'article VI 8b de l'annexe de l'arrêt du 15 mars 2022. Cet article du cahier des charges d'agrément fait en particulier référence au II de l'article 541-10-6 du code de l'environnement « *L'EO est tenu de passer les marchés relevant de son activité agréée selon les procédures d'appels d'offres non discriminatoires et des critères d'attribution transparents, en recherchant des modalités d'allotissement suscitant la plus large concurrence.* »

vont déterminer si **certaines technologies de recyclage chimique et physico-chimique seront écartées de la catégorie « recyclage »**. Des travaux sont ainsi en cours au niveau européen sur le sujet de la recyclabilité. A ce jour, il n'est pas encore clair de quelle manière la réglementation européenne pourrait s'articuler avec cette partie du décret no 2022-748. Dans tous les cas, il est clair que si les rendements sur l'ensemble de la chaîne de valeur (tri, épuration, pyrolyse, vapocraquage, ...) ne sont pas suffisants, il ne sera pas forcément possible de parler de recyclage.

- L'application de la **Mass-Balance** est un **point saillant faisant encore l'objet de discussions et de débats au niveau européen**. Il ressort d'une part la nécessité de clarifier sa transposition aux plastiques recyclés, et de définir une méthodologie de calcul qui **soit commune et adoptée par tous les certificateurs** afin de permettre **une réelle traçabilité des produits entrants et sortants sur la base des mêmes définitions**. Il a été mentionné d'autre part que **plus les approches seraient restrictives, plus il y aurait un risque que le recyclage chimique tarde à se développer, et moins les produits en sortie seraient compétitifs et se développeraient**. La mass balance étant un sujet compliqué, il sera primordial de rester transparent avec le consommateur (avec par exemple une communication sur la matière qui a été recyclée), et **que le prix des matières recyclées soit cohérent avec la quantité de matière recyclée effectivement contenue dans le plastique**.
- Un autre point important est la **sortie du statut de déchet**. Pour la pyrolyse par exemple, certains acteurs considèrent qu'il est nécessaire que les huiles de pyrolyse ne soient pas considérées comme un déchet pour permettre de l'exporter en tant que produit, car l'industrie est **européenne et non nationale**.
- La **réglementation CE N°282-2008 sur le contact alimentaire en cours de révision** devrait exclure les technologies de recyclage chimique qui produisent des monomères, et leur permettrait ainsi de s'affranchir de la contrainte de 95% d'emballages alimentaires actuellement exigée pour le recyclage mécanique dans le gisement entrant pour produire des plastiques recyclés aptes au contact alimentaire. Les technologies produisant en revanche des oligomères en sortie de procédé devraient, elles être incluses dans cette régulation révisée^{viii}. Approuver une MPR produite par une technologie de recyclage chimique pour qu'elle soit considérée comme apte au contact alimentaire pourrait prendre plusieurs années, et si certaines technologies ne sont finalement pas approuvées, **cela pourrait ralentir de potentiels investissements vers ces technologies-là**.

A noter que cette étude est un exercice sur le périmètre France, qui ne considère pas ni les gisements européens ni mondial. De plus, il existe d'autres secteurs générateurs de déchets plastiques non étudiés ici qui peuvent aussi représenter d'importants gisements de déchets plastique et à considérer potentiellement pour alimenter les filières de recyclage chimiques et physico-chimique, tout comme les matériaux composites issus des secteurs aéronautique, nautique, de l'éolien, etc. Le guide GREC¹ récemment publié par l'ADEME identifie via une cartographie qualitative et quantitative les flux de matières et les gisements de déchets dans l'industrie française des composites.

^{viii} A condition que le monomère soit sur la liste 10/2011, ce qui peut exclure le retour au BHET (qui n'est pas vraiment un oligomère).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Classer les références par ordre alphabétique des noms d'auteur ou par ordre d'apparition dans le texte. Si plusieurs auteurs, les séparer par une virgule suivie d'un espace. Il est vivement conseillé de les numérotter, avec renvoi depuis le texte vers la bibliographie.

1. ADEME. GREC - Guide du Recyclage et de l'Ecoconception des Composites. <https://bibliothèque.ademe.fr/dechets-economie-circulaire/5577-grec-guide-du-recyclage-et-de-l-ecoconception-des-composites.html> [consulté le 09/05/2022]
2. PlasticsEurope. Plastics – the Facts 2021. <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2021/> [consulté le 06/05/2022]
3. PlasticsEurope. Recyclage et Valorisation énergétique. <https://www.plasticseurope.org/fr/focus-areas/circular-economy/zero-plastics-landfill/recycling-and-energy-recovery#:~:text=Le%20recyclage%20chimique%20d%C3%A9signe%20un%20processus%20qui%20modifie,%C3%A0%20%C3%AAtre%20utilis%C3%A9s%20pour%20de%20nouvelles%20r%C3%A9actions%20chimiques> [consulté le 10/05/2022]
4. Zero Waste Europe. El Dorado of Chemical Recycling, State of play and policy challenges. <https://zerowasteeurope.eu/library/el-dorado-of-chemical-recycling-state-of-play-and-policy-challenges/?msclkid=7b46667dcf7911ec8e5da606867a2796> [consulté le 09/05/2022]

INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES

TABLEAUX

Tableau 1 : DEEE - Evaluation des déchets à fort potentiel pour les technologies de recyclage chimique et physico-chimique	11
Tableau 2 : Emballages ménagers - Evaluation des déchets à fort potentiel pour les technologies de recyclage chimique et physico-chimique	12
Tableau 3 : Emballages Commerciaux et Industriels - Evaluation des déchets à fort potentiel pour les technologies de recyclage chimique et physico-chimique	13
Tableau 4 : Plastiques agricoles - Evaluation des déchets à fort potentiel pour les technologies de recyclage chimique et physico-chimique	13
Tableau 5 : VHU - Evaluation des déchets à fort potentiel pour les technologies de recyclage chimique et physico-chimique	13
Tableau 6 : Textile (TLC) - Evaluation des déchets à fort potentiel pour les technologies de recyclage chimique et physico-chimique	14
Tableau 7 : DEA - Evaluation des déchets à fort potentiel pour les technologies de recyclage chimique et physico-chimique	14
Tableau 8 : Bâtiment (dont revêtements de sols) - Evaluation des déchets à fort potentiel pour les technologies de recyclage chimique et physico-chimique	15
Tableau 9 : Critères sélectionnés pour l'évaluation des couples gisement-technologie	27

FIGURES

Figure 1 : Gisement de déchets plastique total généré en 2019 en France (par secteur et type de résine)	10
Figure 2 : Plastiques non-recyclés mécaniquement (incluant les tonnages non-collectés et sans considérer les déchets réutilisés) en France en 2019, par secteur et type de résine	11
Figure 3 : Résultats de l'analyse des technologies de recyclage chimique-physico-chimiques applicables aux flux des déchets plastiques non-recyclés en France (Groupes 1, 2, 3, 4 et 5). (Légende Couples : Résine/Secteur – Technologie de recyclage chimique et physico-chimique – Tonnage gisement non-recyclé en France)	16

SIGLES ET ACRONYMES

ABS	Acrylonitrile Butadiène Styrène
ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
AGEC	Anti-Gaspillage pour une Economie Circulaire
C&I	Commerciaux et Industriels
DEA	Déchets d'Éléments d'Ameublement
DEEE	Déchets d'Équipements Electriques et Electroniques
EFSA	European Food Safety Authority
HIPS	Polystyrène-choc / HI pour High-impact en anglais
ND	Non disponible
ONG	Organisation Non Gouvernementale
PA	Polyamide
PAM	Petits Appareils en Mélange (équipements ménagers, informatiques et de télécommunications)
PC	Polycarbonate
PE	Polyéthylène
PEBD	Polyéthylène basse densité
PEHD	Polyéthylène haute densité
PET	Polytéréphtalate d'éthylène
PEX	Polyéthylènes réticulés
PLA	Acide polylactique
PMCB	Produits et Matériaux de Construction du Bâtiment
PMMA	Polyméthacrylate de méthyle
POM	Polyoxyméthylène
POP	Persistent Organic Pollutants
PP	Polypropylène
PS	Polystyrène
PSE	Polystyrène expansé
PU	Polyuréthane
PVB	Polyvinyle butyral
PVC	Polychlorure de vinyle
REP	Responsabilité Elargie des Producteurs
SAN	Styrène-acrylonitrile
TLC	Textiles d'habillement, Linge de maison, Chaussures
TRL	Niveau de maturité technologique / Technology Readiness Level en anglais
VHU	Véhicules Hors d'Usage

ANNEXE I : Critères de sélection des gisements avec un potentiel de valorisation par recyclage chimique et physico-chimique

Les 6 critères suivants ont été considérés pour traduire les principaux éléments qui permettent d'identifier les résines ayant le plus fort potentiel pour être recyclé chimiquement/physico-chimiquement. L'objectif est de mettre ici en évidence de manière synthétique et sur la base des éléments quantitatifs et qualitatifs recueillis dans les paragraphes précédents, les maillons faibles ou problématiques existants qui expliqueraient les raisons pour lesquelles certains types de déchets plastiques auraient été identifiés comme potentiellement intéressants à être revalorisés par le biais du recyclage chimique et physico-chimique. Ces tableaux récapitulatifs permettent également de mettre en évidence les types de déchets plastiques qui sont aujourd'hui déjà bien recyclé mécaniquement en boucle fermée.

6 critères ont été considérés pour traduire les principaux éléments qui permettent d'identifier les résines ayant le plus fort potentiel pour être recyclé chimiquement/physico-chimiquement (cf. ANNEXE I pour plus de détails quant aux seuils d'évaluation choisis pour évaluer ces critères) :

- **Gisement important** : l'aspect lié à la disponibilité du gisement ^{ix} à tout d'abord été pris en compte afin de comprendre quels sont les différents volumes disponibles en France ;
- **Collecte** : les taux de collecte ont ensuite été évalués. Ces taux de collecte ont été calculés sur la base des données quantitatives recueillies dans les précédents paragraphes ;
- **Tri** : le tri a ensuite été analysé pour comprendre quels déchets plastiques ne sont pas recyclés tout simplement parce qu'ils ne sont pas forcément triés (en raison de mauvais taux de captage ; par souci de rentabilité au vu des efforts pour récupérer le déchets plastique ou de la difficulté à recycler ce type de déchet mécaniquement ; etc.) ;
- **Filière de recyclage mécanique bien établie** : ce critère met en exergue les résines pour lesquelles des filières de recyclage mécanique sont déjà plutôt bien établies ;
- **Même usage** : dans le cas où le déchet plastique est déjà recyclé mécaniquement, ce critère permet de se demander si la matière recyclée obtenue serait destinée au même usage (boucle fermée), ou plutôt pour d'autres types d'applications en boucle ouverte ;
- **Existence d'une même demande en MPR pour même usage** : ce dernier critère permet d'évaluer pour chaque résine de chaque secteur s'il y aurait l'existence d'une demande en MPR pour en refaire le même usage.

^{ix} Pour rappel, déchets disponibles = total des déchets générés = total des déchets collectés + non-collectés

Gisement important ?				Filière recyclage mécanique bien établie ?			
✓	≥ 40 kt			✓	Oui		
~	[10 kt ; 40 kt [			~	Oui, mais déploiement limité		
✗	≤ 10 kt			✗	Non		
ND	Non-disponible			ND	Non-disponible		
Collecte				Même usage ?			
✓	≥ 50% (fort)			✓	Oui principalement		
~	[10% ; 50% [(moyen)			~	Oui, mais pas majoritairement/anecdotique		
✗	≤ 10 % / NS (non-significatif)			✗	Non		
ND	Non-disponible			ND	Non-disponible		
Tri				Existence d'une demande en MPR pour même usage ?			
✓	≥ 50% (fort)			✓	Oui		
~	[10% ; 50% [(moyen)			~	Moyennement		
✗	≤ 10 % / NS (non-significatif)			✗	Non		
ND	Non-disponible			ND	Non-disponible		

ANNEXE II : Critères de sélection des gisements avec un potentiel de valorisation par recyclage chimique et physico-chimique

Sur la base des recherches menées dans le cadre de l'étude, les couples [gisement-technologie] identifiées comme valorisables par le biais du recyclage chimique et physico-chimique sont les suivantes :

- 1) Polyoléfines (PE/PP) / Emballages (ménagers, C&I), plastiques agricoles / Craquage hydrothermique ;
- 2) Polyoléfines (PE/PP) / Emballages (ménagers, C&I), plastiques agricoles / Pyrolyse ;
- 3) PET / Emballages (ménagers et C&I) / Glycolyse ;
- 4) PET / Emballages (ménagers et C&I) / Hydrolyse ;
- 5) PET / Emballages (ménagers et C&I) / Méthanolyse ;
- 6) PP / Emballages (ménagers) / Dissolution ;
- 7) PS / Emballages (ménagers) / Pyrolyse ;
- 8) PS / Emballages (ménagers) / Dissolution ;
- 9) PS/ Bâtiment / Pyrolyse ;
- 10) PS / Bâtiment / Dissolution ;
- 11) PA / Textile / Hydrolyse ;
- 12) PET / Textile / Glycolyse ;
- 13) PET / Textile / Hydrolyse ;
- 14) PET / Textile / Méthanolyse ;
- 15) PU souple / Ameublement / Glycolyse
- 16) Polyoléfines (PE/PP) / Secteurs autres que les emballages et les plastiques agricoles (DEEE, VHU, ameublement, et bâtiment) / Pyrolyse ;
- 17) Autres résines (Plastiques en mélange, PVC à éviter) / Tout secteur / Gazéification.

Le tableau ci-dessous (Tableau 9) explique la grille de notation utilisée pour évaluer chacun des couples [gisement-technologie] identifiés au cours des phases précédentes de l'étude.

Tableau 9 : Critères sélectionnés pour l'évaluation des couples gisement-technologie

Critères	Sous-critères	Score : 0	Score : 1	Score : 2	Score : 3
Circularité d u processus	Rendement « plastic-to-plastic »	< 80%]	[80% ; 95%]	> 95%	-
	Etapes supplémentaires e	Plusieurs étapes	1 étape	Aucune étape	-

	n sortie du processus de recyclage (hors purification)				
	Utilisation de la matière recyclée en boucle ouverte/fermée	Boucle ouverte (« downcycling »)	Boucle fermée	Qualité vierge, toutes applications	-
Faisabilité industrielle	Niveau de collecte et de tri du gisement	Aucune filière de collecte	Filière de collecte existante, flux non-trié	Filière de collecte existante, flux partiellement trié	Gisement disponible et suffisamment trié
	Technology Readiness Level (TRL)	De [5 à 6[	De [6 à 8[	8	9
	Projets de recyclage chimique existants	Non, pas de projets existants	Oui, mais pas de projets en UE	Oui, déjà existants ou à horizon 2025 en UE	Oui, déjà existants ou à horizon 2025 en France

Circularité du processus :

- **Rendement « plastic-to-plastic »** : les rendements plastique à plastique ont été utilisés pour exprimer la circularité d'un processus de recyclage. Plus le rendement est élevé, plus la part des produits en sortie est utilisée à des fins de productions de résines plastiques. Il convient de noter que l'utilisation de ce critère présente certaines limites. Notamment le fait que ces chiffres sont généralement divulgués directement par les développeurs de technologies sans spécification de la méthodologie utilisée. Cela peut être assez déroutant, par exemple pour les procédés de pyrolyse, où il n'est pas clair si le rendement comprend les notions de sous-produits, de fraction d'output redirigée vers des applications « plastic-to-fuels », de partie du produit réutilisée pour de la production d'énergie pour le procédé de recyclage, etc. ;
- **Etapes supplémentaires en sortie du processus de recyclage** : plus le nombre d'étapes nécessaires pour raffiner les produits sortants du processus de recyclage est élevé, plus cela risque d'avoir un impact sur la performance environnementale et économique du procédé ou de la chaîne de valeur. L'étape de purification n'a pas été considérée comme une étape de post-traitement car elle fait généralement partie du processus de recyclage lui-même ;
- **Utilisation de la matière recyclée en boucle ouverte/fermée** : dans la perspective d'une économie circulaire, les procédés fonctionnant en boucle fermée seraient préférés à ceux impliquant la dégradation de la qualité des plastiques recyclés (propriétés mécaniques/esthétiques/chimiques). Pour cette raison, le score maximal a été attribué aux technologies de pyrolyse et de gazéification, qui ont la capacité d'atteindre un produit de la même qualité et avec les mêmes possibilités d'application que des matériaux vierges. Un score moyen a été attribué à toutes les technologies capables de recycler leur gisement entrant pour qu'il puisse être réutilisé dans les mêmes applications initiales (boucle fermée – par exemple de bouteille à bouteille, ou de textile à textile). Enfin, une note plus faible a été attribuée à toutes les technologies fonctionnant en boucle ouverte car elles impliquent le déclassement de la valeur des déchets recyclés (ou « downcycling », par exemple de bouteille alimentaire à fibres textile).

Faisabilité industrielle :

- **Niveau de collecte et de tri du gisement** : les technologies de recyclage (même celles qui sont parvenues à maturité) peuvent être freinées par l'impossibilité d'accéder à des gisements de déchets qui présentent les caractéristiques nécessaires à leur fonctionnement. Les nouvelles technologies ne pourront se développer pleinement que si le reste de leur chaîne de valeur est

également mature. Pour cette raison, le niveau des systèmes de collecte et de tri a été considéré comme une expression de la faisabilité industrielle ;

- **Technology Readiness Level (TRL)** : le TRL est une unité de mesure reconnue pour exprimer la maturité d'une technologie. En général, il est considéré que les technologies ayant un TRL ≤ 4 sont encore au stade laboratoire/pré-pilote. Entre TRL 5 à 7, les systèmes sont généralement à l'échelle de démonstration/validation dans un environnement pertinent. À TRL 8, la technologie est testée en vue d'une validation finale. Une fois le TRL 9 atteint, le système est considéré comme prêt pour un déploiement industriel ^{*}.
- **Projets de recyclage chimique existants** : l'existence de projets au niveau mondial, européen ou national a été considérée comme un indicateur de la faisabilité d'une technologie donnée. Les projets en place sur le territoire français ont été privilégiés car ce sont ceux qui sont les plus susceptibles d'être utilisés comme solutions pour les tonnages de déchets non-recyclés en France. Les technologies disponibles au niveau européen peuvent également être utilisées, mais cela nécessiterait soit d'exporter les déchets, soit d'importer la technologie avec les délais que cela implique.

ANNEXE III : Liste des développeurs analysés

Liste complète des développeurs de technologie de recyclage chimique et physico-chimique inclus dans la base des données créée pour identifier et évaluer les couples [gisement-technologie].

N°	Développeur de technologie	Type de technologie	Sous-catégorie de technologie	Plastique(s) ciblé(s)
1.	Perpetual Technologies	Solvolyse	Glycolyse	PET
2.	Dow (techno H&S)	Solvolyse	Glycolyse	PU
3.	Aquafil	Solvolyse	Hydrolyse	PA6
4.	Carbios	Solvolyse	Hydrolyse	PET
5.	Gr3n	Solvolyse	Hydrolyse	PET
6.	IFPEN/Axens (techno JEPLAN)	Solvolyse	Glycolyse	PET
7.	TRINSEO/Projet MMATwo	Dépolymérisation thermique	<i>tbc</i>	PMMA
8.	Polyloop	Dissolution	Dissolution	PVC souple (composites)
9.	Polystyvert	Dissolution	Dissolution	PS
10.	PolyStyreneLoop (techno Creacycle)	Dissolution	Dissolution	EPS
11.	Pyrowave	Dépolymérisation thermique	Pyrolyse catalytique (micro-ondes)	PS
12.	Pryme Cleantech	Dépolymérisation thermique	Pyrolyse catalytique	Polyoléfines (PE/PP)
13.	Borealisgroup	Dépolymérisation thermique	Pyrolyse non-catalytique	Polyoléfines (PE/PP)
14.	Plastic Energy	Dépolymérisation thermique	Pyrolyse non-catalytique	Polyoléfines (PE/PP)
15.	Enval	Dépolymérisation thermique	Pyrolyse non-catalytique (micro-ondes)	Polyoléfines (PE/PP), PS, et laminés aluminium
16.	Agilyx	Dépolymérisation thermique	Pyrolyse non-catalytique	PS ou plastiques en mélange

^{*} Chaque couple identifié peut selon les technologies considérées regrouper plusieurs développeurs de technologie qui n'ont pas toujours le même niveau de maturité (TRL) dans le développement de leur technologie. Ainsi pour évaluer le sous-critère TRL, une moyenne sur les 3 premiers développeurs de technologie les plus matures a été établie.

17.	Recycling Technologies UK	Dépolymérisation thermique	Pyrolyse non-catalytique	Polyoléfines (PE/PP)
18.	ITERO	Dépolymérisation thermique	Pyrolyse non-catalytique	Polyoléfines (PE/PP)
19.	MURA Technologies	Dépolymérisation thermique	Craquage hydrothermique	Polyoléfines (PE/PP)
20.	Synova Tech	Dépolymérisation thermique	Gazéification	Plastiques en mélange
21.	IFPEN/Axens	Dépolymérisation thermique	Gazéification	Plastiques en mélange
22.	APK AG (techno Creacycle)	Dissolution	Dissolution	Multilayer films (PE/PA, PET/PE or PE/Alu films)
23.	Creacycle	Dissolution	Dissolution	PE
24.	Purecycle Technologies	Dissolution	Dissolution	PP
25.	Emery Oleochemicals.	Solvolyse	Glycolyse	PU
26.	H&S anlagentechnik	Solvolyse	Glycolyse	PU
27.	RAMPF Eco	Solvolyse	Glycolyse	PU
28.	Eastman 1	Solvolyse	Glycolyse	PET
29.	Eastman 2	Solvolyse	Methanolyse	PET
30.	Garbo	Solvolyse	Glycolyse	PET
31.	Ioniqa Technologies	Solvolyse	Glycolyse	PET
32.	JEPLAN	Solvolyse	Glycolyse	PET
33.	Loop Industries	Solvolyse	Methanolyse	PET
34.	Morssinkhof/Cumapol/DSM-Niaga/DuFor/NHL Stenden University	Solvolyse	Glycolyse	PET
35.	Poseidon Plastics (JV between Green Lizard Technologies Ltd, Panima Capital and Abundia Industries LLC.)	Solvolyse	Glycolyse	PET
36.	RITTEC	Solvolyse	Hydrolyse	PET
37.	SOPREMA	Solvolyse	Glycolyse	PET
38.	Annellotech (Plast-Tcat technology)	Dépolymérisation thermique	Pyrolyse catalytique	Plastiques en mélange
39.	Arcus Greencycling	Dépolymérisation thermique	Pyrolyse non-catalytique	Plastiques en mélange
40.	Bio-BTX	Dépolymérisation thermique	Pyrolyse catalytique	Plastiques en mélange
41.	Carboliq (subsidiary of RECENSO)	Dépolymérisation thermique	Pyrolyse catalytique	Plastiques en mélange
42.	Cassandra Oil	Dépolymérisation thermique	Pyrolyse catalytique	Plastiques en mélange
43.	Clariter	Dépolymérisation thermique	Pyrolyse non-catalytique	Polyoléfines (PE/PP)
44.	Enerkem	Dépolymérisation thermique	Gazéification	Plastiques en mélange
45.	Fuenix Ecology Group	Dépolymérisation thermique	Pyrolyse non-catalytique	Plastiques en mélange
46.	Karlsruhe Institute of Technology (KIT) and Lyondell Basell	Dépolymérisation thermique	Pyrolyse catalytique	Plastiques en mélange
47.	OMV (partnership with Boréal)	Dépolymérisation thermique	Pyrolyse non-catalytique	Plastiques en mélange
48.	Quantafuel	Dépolymérisation thermique	Pyrolyse catalytique	Polyoléfines (PE/PP), PS

49.	Showa Denko	Dépolymérisation thermique	Gazéification	Plastiques en mélange
50.	Greenmantra Technologies	Dépolymérisation thermique	Pyrolyse catalytique	PS
51.	Indaver	Dépolymérisation thermique	Pyrolyse non-catalytique	Polyoléfines (PE/PP), PS

L'ADEME EN BREF

À l'ADEME - l'Agence de la transition écologique -, nous sommes résolument engagés dans la lutte contre le réchauffement climatique et la dégradation des ressources.

Sur tous les fronts, nous mobilisons les citoyens, les acteurs économiques et les territoires, leur donnons les moyens de progresser vers une société économe en ressources, plus sobre en carbone, plus juste et harmonieuse.

Dans tous les domaines - énergie, économie circulaire, alimentation, mobilité, qualité de l'air, adaptation au changement climatique, sols... - nous conseillons, facilitons et aidons au financement de nombreux projets, de la recherche jusqu'au partage des solutions.

À tous les niveaux, nous mettons nos capacités d'expertise et de prospective au service des politiques publiques.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

LES COLLECTIONS DE L'ADEME



FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



EXPERTISES

L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.



HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.



GISEMENTS DE DECHETS PLASTIQUES POUVANT ETRE TRAITES PAR RECYCLAGE CHIMIQUE ET PHYSICO-CHIMIQUE EN FRANCE

Le présent rapport présente un état des lieux exhaustif des gisements de déchets plastiques générés par les principaux secteurs les plus consommateurs de plastiques en France en 2019, et identifie les technologies de recyclage chimique et physico-chimique ayant le plus fort potentiel de développement pour traiter ces gisements de déchets disponibles en France. Ce travail est motivé par la volonté grandissante de garantir la transition vers une économie circulaire.

Ce guide ambitionne de couvrir les principaux objectifs suivants : *I.* Rappel comment sont organisées les filières de gestion des déchets plastiques actuellement et leurs perspectives d'évolution ; *II.* Etablir une cartographie des gisements de déchets plastiques générés, et non ou mal valorisés en France par typologie de résines et par secteurs ; *III.* Caractériser les couples [gisements de déchets/technologies de recyclage chimique et physico-chimique] les plus pertinents pour le cas de la France selon leur niveau de maturité industrielle et de participation à la mise en place d'une économie circulaire.

Cette étude sur les gisements de déchets plastiques pouvant être traités par recyclage chimique et physico-chimique en France intervient au moment où plusieurs de ces technologies-là ambitionnent de s'implanter en Europe, compte-tenu des gisements disponibles et de la maturité des filières de collecte comparé à différentes régions du monde. Cette étude permet de dresser un état des lieux des gisements générés et disponibles en France, afin d'aider à choisir les solutions les plus appropriées pour lutter contre la pollution plastique.

