

Recyclage : vers des systèmes industriels performants pour une transition écologique efficace

Rapport de l'Académie



Académie des technologies
Le Ponant — Bâtiment A
19, rue Leblanc
75015 PARIS
+33(0)1 53 85 44 44

secretariat@academie-technologies.fr
www.academie-technologies.fr

© Académie des technologies
ISBN : 979-10-97579-49-4

couverture : Anoo@Adobe Stock

RECYCLAGE : VERS DES SYSTÈMES INDUSTRIELS PERFORMANTS POUR UNE TRANSITION ÉCOLOGIQUE EFFICACE

Rapport de l'Académie des technologies

novembre 2023

SOMMAIRE

Résumé général	11
Introduction	13
Chapitre 1	
Collecte, tri et transformation	21
1.1. Cadre législatif général français	21
1.2. Organisation par filière REP	28
1.3. Innovation technologique	33
1.4. Éco-conception, systèmes industriels et formation	39
1.5. Recommandations	42
Chapitre 2	
Plastiques et composites	47
2.1. Plastiques	47
2.2. Composites	58
2.3. Recommandations	65
Chapitre 3	
Équipements électriques et électroniques	67
3.1. Recommandations	77
Chapitre 4	
Bâtiment et travaux publics (BTP)	79
4.1. Recommandations	85

Conclusions	87
Annexe 1	89
Annexe 2	91
Annexe 3	93
Annexe 4	95
Annexe 5	99
Annexe 6	101

RÉSUMÉ GÉNÉRAL

Des systèmes industriels performants, intégrés dans les circuits de collecte, de tri et de transformation de la matière, détermineront la viabilité économique du recyclage à grande échelle, facteur clé de réussite de l'économie circulaire et de la transition écologique.

Associées à l'engagement des citoyens (particuliers et entreprises), à l'innovation technologique et à l'adaptation de la législation et de la réglementation, la cohérence et l'efficacité de systèmes industriels à tous les niveaux (local, régional, national, européen et international) seront indispensables à la réalisation de la transition. Sans systèmes industriels positionnés dans des modèles économiques viables, la complexité organisationnelle et la charge financière des opérations de collecte, de tri et de traitement des matériaux et des objets usagés rendront irréalisable l'atteinte des objectifs écologiques. Compte tenu de l'ampleur des flux de matière concernés par le recyclage, un développement industriel d'envergure et soutenable économiquement pour l'ensemble des acteurs de la chaîne de circularité, constitue un impératif majeur.

L'Académie des technologies recommande les cinq orientations prioritaires suivantes :

- 1) **Transversalité** : promouvoir une vision transversale technique, économique et sociale entre les différentes filières, les industries de tri et de recyclage et les fabricants de matériaux, en visant, dans la mesure du possible, une harmonisation des pratiques.
- 2) **Analyses et données indépendantes** : créer un écosystème d'analyse et de recueil de données rigoureux, capable d'assurer un climat de confiance et de stabilité, avec une vision collective de sa validité.
- 3) **Affichage** : associer une valeur environnementale publiable à un produit en fonction de sa conception, à partir de données et d'analyses normalisées et certifiées d'éco-conception.

- 4) **Droit du travail** : reconnaître juridiquement les métiers du démantèlement et du démontage, dans les conventions collectives, comme des métiers à part entière.
- 5) **Formation** : repenser la formation des ingénieurs, techniciens et enseignants afin d'y intégrer des compétences en démontage et en éco-conception.

D'autres recommandations complémentaires plus détaillées par domaine¹ se trouvent à la fin de chacun des chapitres du rapport.

1 Collecte, tri et transformation ; plastiques et composites ; équipements électriques et électroniques ; bâtiment et travaux publics

INTRODUCTION

La transition écologique² constitue un enjeu central du ^{xxi}^e siècle, car elle concerne directement la survie de l'espèce humaine, en coexistence avec les autres espèces vivantes de la planète.

Face à cet enjeu planétaire, les Objectifs de développement durable (ODD), adoptés par l'Organisation des Nations unies dans son Agenda 2030³, décrivent la voie à suivre pour l'humanité au travers d'un ensemble intégré d'engagements, à la fois sur les plans social, économique et environnemental. L'ambition est celle d'un avenir durable pour la totalité de la population de la Terre.

Économie circulaire de matériaux et d'objets matériels : la place essentielle du recyclage

Parmi les nombreux défis posés par les ODD se trouve la gestion des circuits de matières, de matériaux et d'objets matériels. Comme pour tout usage, la meilleure manière de réduire l'impact environnemental de l'utilisation des ressources matérielles est de limiter la production et la consommation d'objets à ce qui peut être considéré comme étant raisonnablement nécessaire. Cela peut se faire par une augmentation de la durée de vie des objets, par un meilleur taux d'occupation des machines, par

2 Transition écologique : évolution vers un nouveau modèle économique et social, un modèle de développement durable qui renouvelle nos façons de consommer, de produire, de travailler, de vivre ensemble pour répondre aux grands enjeux environnementaux, ceux du changement climatique, de la rareté des ressources, de la perte accélérée de la biodiversité et de la multiplication des risques sanitaires environnementaux.

(source : <https://www.manche.gouv.fr/Actions-de-l-Etat/Amenagement-territoire-energie/Developpement-Durable/La-transition-ecologique>)

3 <https://www.agenda-2030.fr/17-objectifs-de-developpement-durable/>

une diminution du recours à des éléments superflus ou non essentiels (tels les emballages excessifs ou les produits jetables).

À ces efforts de sobriété dans l'utilisation des objets matériels s'ajoutent d'autres mesures qui concernent la production : développer des approches d'éco-conception permettant le réemploi de tout ou partie des objets, et faciliter la réparation des objets ou la réutilisation des matériaux qui les composent. Afin d'augmenter le temps d'utilisation des objets courants, une économie de la fonctionnalité peut être envisagée, où les objets ne sont pas vendus mais plutôt loués pour leurs fonctions ou pour un service (par exemple, un kilométrage de véhicule, une protection d'une surface par une peinture pour une durée déterminée, etc.). Enfin, pour certains matériels qui font l'objet de circuits courts ou de fabrications locales, on peut espérer un meilleur rendement des usages en jouant sur l'organisation de la production et de la distribution. La démarche de la logistique inverse⁴ offre également, à d'autres échelles mais dans la même optique, des perspectives prometteuses.

Ces approches de réduction des flux matériels sont à promouvoir et à développer en priorité, mais elles ont malgré tout leurs limites, liées entre autres aux exigences sanitaires, d'étiquetage ou de transport, voire à la nature même des usages. Il est par conséquent nécessaire de reconnaître que des flux matériels importants continueront à exister et devront être gérés dans l'intérêt de la préservation des ressources. Les politiques de recyclage des matériaux ont un rôle important à jouer dans ce contexte de préservation, avec l'objectif d'une économie circulaire permettant de limiter l'exploitation de gisements de matériaux primaires grâce à la récupération de matériaux usagés.

Plus précisément, appliquée au domaine des matériaux et des objets matériels, l'économie circulaire vise à remplacer un système de production et de consommation linéaire (du berceau au tombeau) par un système

4 Logistique inverse (ou logistique retour) : « le processus de déplacement des marchandises à partir du lieu de livraison final afin de capturer de la valeur additionnelle ou les éliminer de manière appropriée » (Voir : Hawks, Karen. "What is Reverse Logistics ? ", *Reverse Logistics Magazine*, Winter/Spring 2006).

alternatif organisé en boucle fermée (du berceau au berceau), où les ressources nécessaires à la production de nouveaux objets proviennent du recyclage des matériaux qui composent d'anciens objets en fin de vie⁵.

Bien que le recyclage ne soit que l'une des ambitions d'une économie circulaire (où le réemploi et la réutilisation devraient être privilégiés), il n'en reste pas moins un élément essentiel et indispensable. Organisés à grande échelle (au niveau d'une collectivité ou d'une région, voire d'un pays ou même d'un continent entier), des systèmes de recyclage des matériaux constituent non seulement une nécessité environnementale locale, mais également un impératif moral. En effet, il n'est pas acceptable qu'une population consommatrice d'objets « exporte » ses déchets vers d'autres lieux de la planète où les déchets sont traités par des femmes et des hommes dans des conditions de travail insalubres ou dangereuses.

De ce point de vue de la circulation internationale de déchets, il convient de noter qu'en Europe, une multitude d'objets manufacturés viennent d'autres continents (par exemple, d'Asie). Ces objets d'importation finissent leur vie sur les territoires nationaux européens et y constituent un enjeu environnemental important. Les flux internationaux de déchets interrogent le statut légal des déchets et les limites de la circularité du commerce international tout au long des chaînes de traitement.

Deux cas se présentent, selon que le recyclage d'un matériau ou d'un objet peut ou ne peut pas actuellement être économiquement valorisé. Dans le cas de débouchés rentables, encore faut-il que les conditions technologiques et économiques permettent de faire sortir ces matériaux de leur statut juridique négatif de « déchets » (c'est-à-dire des « résidus » abandonnés ou destinés à l'abandon) pour en faire des « ressources » commercialisables pour de futurs usages⁶. La valeur économique positive ainsi dégagée permettra de remplacer (ou du moins de diminuer) le pré-

5 Économie circulaire : «...consiste à produire des biens et des services de manière durable en limitant la consommation et le gaspillage des ressources et la production des déchets.» (Voir : <https://www.ecologie.gouv.fr/lEconomie-circulaire>).

6 Voir : Bertolini, Gilbert, « Approche socio-économique des déchets », *Techniques de l'ingénieur*, G2300 V2, janvier 2004.

lèvement de ressources primaires naturelles. Dans ce cas, il conviendrait naturellement de veiller à ce que les circuits d'échange de ces matériaux valorisables respectent la réglementation (commerciale et douanière) afin d'éviter tout risque de contrebande, de marchés illicites ou de mouvements transfrontaliers non contrôlés.

Malheureusement, pour une part importante des matières, matériaux et objets matériels destinés au recyclage, une valorisation économique positive ne sera pas immédiatement possible, car les services de recyclage ne sont pas toujours rentables. Dans ces cas, il est de la responsabilité de la collectivité de mettre en place des moyens appropriés (tels des réglementations nationales, des objectifs de recyclage ou des écocontributions), ainsi que des systèmes de redistribution, pour que tous les acteurs de la chaîne de recyclage (de la collecte jusqu'au retour des matières recyclées dans l'économie) puissent jouer leur rôle. Pour que les charges financières pesant sur les producteurs (industries, distributeurs) ou sur les collectivités (municipalités, régions, pays), et par conséquent sur les consommateurs/contribuables, ne soient pas excessives, il est indispensable que les systèmes de recyclage soient performants et efficaces.

Efficacité du recyclage : les systèmes industriels et la technologie comme facteurs clés de réussite

Bien que les objectifs de transition écologique, et la place qu'y occupe le recyclage, soient généralement soutenus très positivement par les populations, la mise en œuvre de politiques publiques spécifiques pour atteindre ces objectifs est sujette à débats. En particulier, le rapport coût/bénéfice constitue un sujet sensible. Dans les pays comme la France, où l'efficacité économique des mesures influe sur les prises de décision politique, cette efficacité peut servir de levier pour que la population participe activement au recyclage. De même, dans une économie de marché, la réponse à la question « qui paie ? » devient essentielle, surtout lorsqu'il s'agit

de services d'élimination réglementairement obligatoires qui ont forcément un coût, en particulier pour des déchets non valorisables par ailleurs.

C'est ici que les systèmes et technologies industriels, et l'innovation technologique en général, jouent un rôle déterminant. À cela s'ajoute la nécessité d'une anticipation dans la durée de la qualité et de la quantité des charges de déchets à traiter. Certes, l'industrie et les technologies seules ne suffiront pas, mais elles peuvent (et doivent) contribuer à rendre les mesures les plus efficaces possible sur le plan économique.

Tel est le contexte dans lequel s'inscrit le présent rapport de l'Académie des technologies. Il vise à exposer le rôle et l'importance des systèmes industriels dans le domaine spécifique du recyclage des matériaux⁷, ainsi que les verrous d'ordre technologique, normatif ou réglementaire à débloquer afin d'atteindre les objectifs de transition écologique.

Émissions de gaz à effet de serre et autres impacts environnementaux : limites à prendre en compte

Au-delà de la notion générale d'efficacité industrielle et économique abordée dans le présent rapport, il est important de signaler l'éventualité d'un impact environnemental néfaste résultant des procédés de recyclage eux-mêmes. Même si on peut supposer que dans une majorité de cas l'impact environnemental du recyclage serait moindre qu'une production à partir d'une source de matière primaire, il peut exister des cas contraires (tels que l'extraction de métaux rares présents à très faible concentrations dans un gisement de déchets ou l'emploi de sources d'énergie émettrices de gaz à effet de serre dans un procédé de recyclage).

Dans de tels cas, il conviendrait de procéder à une comparaison quantitative (de type analyse du cycle de vie (ACV)) sur l'ensemble de la chaîne circulaire de recyclage proposée (en y intégrant notamment la collecte, le

7 notamment dans les domaines d'application à enjeux particuliers du point de vue de leur cycle de vie et des volumes de matière à recycler

tri, la transformation, le transport et la réutilisation) par rapport à d'autres approches non circulaires alternatives. Cette comparaison quantitative aurait pour objectif principal de s'assurer que les bénéfices du recyclage proposé du point de vue de la conservation de la matière ne sont pas obérés par des impacts environnementaux néfastes ou par la génération d'émissions excessives de gaz à effet de serre lors des différentes étapes du recyclage.

Si des impacts environnementaux néfastes ou des émissions excessives de gaz à effet de serre résultant d'un procédé de recyclage étaient constatés, cela conduirait nécessairement à l'abandon du développement du procédé de recyclage en question. Ceci dit, de telles considérations ne devraient pas concerner la majorité des opérations de recyclage examinés dans le présent rapport et par conséquent elles n'y sont pas abordées.

Périmètre du rapport

Le présent rapport concerne le recyclage des matériaux composant des objets de consommation courante, ainsi que les circuits de collecte, de tri et de traitement liés à ce recyclage. La valorisation de matière est privilégiée et le rapport n'aborde que très ponctuellement les voies de valorisation énergétique (par exemple, par incinération) et n'a pas vocation à traiter, au-delà du recyclage, le domaine très vaste de l'économie circulaire dans son ensemble.

Pour préciser encore les choses, la collecte de déchets est de nature très différente suivant que l'on s'intéresse à des entreprises de production ou à des objets matériels en fin de vie.

Dans le premier cas, des prestataires de service ou des recycleurs (et dans certains cas les industriels producteurs eux-mêmes lorsqu'ils peuvent traiter leurs propres chutes et certains types de déchets triés) reprennent les chutes valorisables et s'occupent de traiter et/ou d'éliminer les co-produits de l'activité qui sont soumis à une législation environnementale très complète. Certains co-produits peuvent être utilisés dans d'autres industries (selon la notion de parc industriel, par exemple, où les co-produits

d'une entreprise servent de matière première à une autre entreprise à proximité), mais ces cas ne seront que peu évoqués ici.

Dans le deuxième cas, celui des ménages ou des artisans, des filières de reprise existent pour certains objets de grande taille tels que véhicules, meubles ou gros électroménagers. C'est le cas aussi pour certains objets comme des piles ou des lampes. Néanmoins, beaucoup de petits objets de ce type se retrouvent *de facto* en fin de vie dans les mêmes poubelles que les déchets alimentaires ou les emballages. Les collectivités s'occupent alors de l'enlèvement et du traitement.

Ce rapport se focalise principalement sur les objets et matières en fin de vie ainsi que sur les déchets des ménages et n'évoque que très partiellement les déchets alimentaires. De plus, certains secteurs qui disposent déjà de systèmes industriels de recyclage très performants (verre, papier, aluminium, acier,...) ne sont pas évoqués.

Le rapport expose le point de vue de l'Académie des technologies à travers une série non exhaustive de sujets⁸, organisés par domaine et destinés à illustrer diverses facettes de la problématique. Chaque chapitre présente des recommandations et préconisations spécifiques à chaque sujet et le rapport se termine par une proposition de cinq recommandations générales considérées comme prioritaires.

8 collecte, tri et transformation ; plastiques et composites ; équipements électriques et électroniques ; bâtiment et travaux publics

Chapitre 1

COLLECTE, TRI ET TRANSFORMATION

1.1. CADRE LÉGISLATIF GÉNÉRAL FRANÇAIS

La Loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte (loi TECV) de 2015⁹, suivie de la Loi relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire (loi AGECE) de 2020¹⁰, fixe un cadre législatif général pour la collecte, le tri et la transformation des déchets. Elle est assortie d'objectifs à atteindre, parmi lesquels :

- la réduction de 15 % des quantités de déchets ménagers et assimilés par habitant en 2030 par rapport à 2010
- la réduction de 5 % des quantités de déchets d'activités économiques par unité de valeur produite en 2030 par rapport à 2010

En outre, l'élimination des déchets par mise en décharge ou incinération sans valorisation énergétique constitue une perte significative de ressources que la législation vise à réduire au strict minimum. À ce titre, la loi AGECE prévoit qu'en 2025 deux fois moins de déchets non dangereux non

9 Loi TECV : loi n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte

10 Loi AGECE : loi n° 2020-105 du 10 février 2020 relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire

inertes seront admis en installation de stockage ISDI¹¹ par rapport à 2010. Cet objectif est ambitieux, car il y a une augmentation naturelle de la production de déchets en raison de la croissance démographique, estimée à 6,9 % environ sur la période de 2010 à 2025 en France¹².

La clé de l'atteinte de ces objectifs réside notamment dans la prévention, le tri à la source et la collecte séparée des déchets dès leur production. La législation cherche à éviter au maximum les mélanges de déchets de manière à constituer autant que possible un gisement homogène non souillé qui produira de la matière recyclée de qualité¹³.

Communication, signalétique et tarification incitative

La législation, comme ce rapport, s'intéresse en grande partie au cas des déchets ménagers. C'est dans cette optique que la loi TECV vise à améliorer le tri à la source pour les ménages, car les gestes de tri inadéquats des ménages représentent plus de 30 % des déchets ménagers. La diminution des erreurs de tri au niveau des ménages passe sans doute par des consignes de tri simples à comprendre et un nombre raisonnable de poubelles et de lieux de stockage intermédiaires. Ces consignes seront probablement à adapter suivant le territoire considéré (rural, urbain, banlieue, etc.). Cette stratégie suppose d'une part un développement et une adaptation des techniques de tri en aval ainsi qu'une communication simple et claire assortie de tarifications incitatives (telles que la redevance d'enlèvement des ordures ménagères incitative (REOMi) ou la taxe

11 ISDI : une installation de stockage de déchets inertes (ISDI) (anciennement appelée « décharge de classe 3 ») est une installation classée pour la protection de l'environnement (ICPE) qui réceptionne des déchets inertes en vue de les éliminer par enfouissement ou comblement sur site

12 Source : INSEE : « Évolution de la population de la France de 1990 à 2070 (scénario central de projection) »

13 Note : sans le remettre en cause, cet objectif doit être nuancé en fonction des filières et des contextes géographiques, et il ne devrait pas servir à empêcher le développement d'autres approches. À titre d'exemple, il est possible d'obtenir actuellement des matières à recycler de bonne qualité en triant la poubelle grise. Les tris en amont (à la source) et en aval peuvent ainsi coexister et être complémentaires.

d'enlèvement des ordures ménagères incitative (TEOMi)¹⁴). Le développement de la consommation hors foyer ou nomade nécessite par ailleurs une adaptation du circuit de collecte des déchets dans l'espace public et les transports. Cette extension des consignes de tri est inscrite dans la loi TECV et devait, en principe, être réalisée à la fin de l'année 2022, mais ce n'est pas encore le cas partout, en raison notamment du temps nécessaire pour faire les adaptations locales.

La loi TECV prévoit également l'application d'une signalétique commune sur les produits recyclables et l'extension des consignes de tri à tous les plastiques avant fin 2022, suivant en cela une recommandation de l'ADEME étendue au plan national, ainsi qu'à terme une tarification incitative d'enlèvement des ordures en lien avec cet objectif.

En matière de communication, la loi TECV prévoit une politique municipale d'information du public, qui s'attachera à expliquer les enjeux économiques, environnementaux, sociaux et sociétaux liés à la gestion des déchets ménagers. Cette communication devra également expliquer comment la gestion des déchets ménagers est financée et comment sont utilisées les contributions perçues par les éco-organismes (voir l'importance des filières de Responsabilité élargie du producteur (REP) plus loin).

Un élément clé de la loi TECV pour l'implication du citoyen dans le geste de tri est qu'il perçoive ce geste comme un enjeu économique personnel. La loi TECV prévoit que 15 millions d'habitants soient concernés par une tarification incitative en 2020 et 25 millions en 2025. Pour que l'incitation soit efficace, il faut que le citoyen soit mis en face de solutions réalistes et réalisables. C'est pourquoi la mise en place du tri à la source des biodéchets dans le même temps que la tarification incitative est un facteur clé du succès.

14 REOMi: redevance facturée à l'usager par les collectivités qui la mettent en place; TEOMi: taxe additionnelle au foncier bâti perçue par les services fiscaux avant d'être reversée à la collectivité (source: ADEME)

En ce qui concerne l'information du consommateur, la réglementation actuelle¹⁵ comporte plusieurs dispositions, parmi lesquelles :

- l'obligation d'informer le consommateur, par voie de marquage ou d'étiquetage, sur l'incorporation de matière recyclée, l'emploi de ressources renouvelables, la durabilité, la compostabilité, la réparabilité, les possibilités de réemploi et la recyclabilité
- l'identification des produits et emballages en matière plastique dont la compostabilité ne peut être obtenue qu'en unité industrielle : de tels produits ne peuvent porter la mention « compostable »
- l'obligation d'apporter la mention « ne pas jeter dans la nature » sur tous les produits et emballages en matière plastique compostables en compostage domestique ou industriel
- l'obligation de préciser le pourcentage de matières recyclées effectivement incorporées, lorsqu'il est fait mention du caractère recyclé d'un produit
- la mise à disposition obligatoire d'informations au public par voie électronique par toute personne qui met sur le marché des produits qui comportent des substances avec des propriétés de perturbation endocrinienne avérées ou présumées
- l'encouragement de la mise en place d'un dispositif volontaire d'affichage environnemental, ou environnemental et social

15 Réglementation issue de décrets d'application des lois TECV (2015), AGECE (2020) et « Climat et résilience » (2021)

Dispositions relatives aux biodéchets ménagers

D'après la loi TECV, tous les ménages devront disposer en 2024 d'une solution de tri à la source de leurs déchets de cuisine et déchets verts. Un compostage de proximité (compostage domestique) et/ou compostage collectif de proximité (compostage partagé de quartier ou en pied d'immeuble par exemple) est prévu, ainsi que l'organisation de tournées de collecte spécifiques et dédiée aux biodéchets. Les conteneurs nécessaires pour cette collecte sont à étudier particulièrement pour qu'ils soient effectivement utilisés sans être des nids à organismes nuisibles et qu'on puisse effectuer la collecte dans de bonnes conditions d'hygiène et de sécurité. À ce titre, la simple distribution de composteurs ne peut être considérée comme suffisante pour la mise en place d'un tri à la source. Il faut un programme réel, accompagné et suivi dans le temps par du personnel dédié. Et toute la chaîne de collecte et de valorisation (méthanisation, compostage, retour au sol) devra être optimisée avec la collaboration des territoires.

Éléments juridiques et financiers

La loi AGECE a introduit une multitude de dispositions pour utiliser la Responsabilité élargie des producteurs (REP¹⁶) comme un outil de développement des filières de valorisation, y compris par l'intégration de matières recyclées dans les objets neufs et le renforcement du réemploi. À ce titre, l'article 54 de la loi AGECE aborde directement le sujet du statut juridique de déchet, tel que prévu par les directives européennes, par l'insertion d'un nouvel article dans le code de l'environnement (article L. 541-4-4 relatif au bâtiment) qui précise que « [d]ans le cadre d'un chantier de réhabilitation

16 REP : Responsabilité élargie des producteurs : le principe de la REP : « celui qui fabrique, qui distribue un produit ou qui importe un produit doit prendre en charge sa fin de vie. Le producteur et le distributeur doivent ainsi financer, organiser et mettre en place les solutions de collecte, de réutilisation ou de recyclage appropriées pour [le] produit. » (source : ministère de la transition écologique)

ou de démolition de bâtiment, si un tri... est effectué..., les produits et équipements destinés au réemploi ne prennent pas le statut de déchet.»

La Loi Climat et Résilience¹⁷ de 2021 a introduit de nouvelles mesures « anti-gaspillage », parmi lesquelles l'expérimentation du dispositif « oui pub » (absence de publicités en papier dans les boîtes aux lettres sauf demande expresse de l'habitant¹⁸) et le développement de la vente en vrac pour réduire à la source des emballages. La trajectoire de la taxe générale sur les activités polluantes (TGAP¹⁹) sera également poursuivie à la hausse pour aider à privilégier des solutions de valorisation plutôt que d'élimination de déchets. À ce titre, la Loi de finances de décembre 2016 a planifié une hausse de la TGAP jusqu'en 2025, dans l'optique de donner une visibilité aux acteurs économiques leur permettant d'anticiper l'impact financier.

Rôle de l'économie sociale et solidaire

Les centres de tri, par eux-mêmes, embauchent de nombreuses personnes pour des emplois peu qualifiés, et une part importante du démontage préalable à beaucoup d'opérations de recyclage est accomplie dans le cadre de l'économie sociale et solidaire. L'entreprise « les Ateliers du bocage »²⁰ en est un exemple. Spécialisée dans le reconditionnement et le recyclage de matériel informatique et de téléphonie, de palettes en bois,

17 Loi Climat et Résilience : loi n° 2021-1104 du 22 août 2021 portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets

18 Le dispositif « oui pub » inverse la logique de l'actuel dispositif « non pub » qui oblige un habitant à afficher son refus de recevoir de publicités en papier dans sa boîte aux lettres. Avec « oui pub », l'interdiction de distribution de publicités en papier existe par défaut

19 TGAP : taxe générale sur les activités polluantes. La TGAP a pour objectif de favoriser « la prévention, la réutilisation, le recyclage et la valorisation des déchets. Elle vise également à inciter les acteurs économiques à investir dans des secteurs d'activité comme le recyclage des déchets. » (source : ADEME)

20 <https://ateliers-du-bocage.fr> : une coopérative d'utilité sociale et environnementale située dans le département des Deux Sèvres, membre du mouvement Emmaüs

d'alimentaire invendu et d'espaces verts, l'entreprise emploie 175 personnes dont 40 % d'opérateurs issus de parcours d'insertion.

Globalement, ce secteur s'avère être un important pourvoyeur d'emplois peu qualifiés pour des personnels, et cette activité permet ainsi une insertion sociale de personnes sans travail. Il faut cependant rester attentif car elle peut facilement tourner à l'exploitation d'une main d'œuvre sous-qualifiée. À l'heure actuelle, les activités de démontage ou démantèlement ne sont pas reconnues comme des métiers à part entière par le Bureau international du travail ou à l'échelle nationale par le Ministère du Travail, du Plein emploi et de l'Insertion, une situation qui ne favorise pas l'encadrement approprié de tels métiers (salaires, conditions de travail et santé au travail). Une meilleure reconnaissance de ces métiers serait souhaitable.

Hygiène et sécurité

Au-delà de la reconnaissance des métiers, une attention particulière à la protection de la santé des opérateurs est primordiale, car les opérations de recyclage peuvent générer des expositions complexes à des poussières métalliques, des solvants organiques ou inorganiques, et à des composés dangereux ou toxiques. Et il peut aussi y avoir production de déchets secondaires. Ces éléments d'hygiène et de sécurité constituent ainsi une spécificité du secteur d'activité du recyclage et cette spécificité doit être prise en considération dans les analyses de l'impact environnemental des procédés.

1.2. ORGANISATION PAR FILIÈRE REP

Organisation administrative et industrielle du recyclage et de la valorisation

Un volet important des lois TECV et AGECE concerne l'organisation des filières REP et l'approfondissement de leur mise en œuvre²¹.

La France, en lien avec l'OCDE et l'Union européenne, s'est organisée en filières « REP » depuis 1975, et il existe une vingtaine de filières françaises actives actuellement. Les filières REP fonctionnent avec des écocontributions qui leur donnent les moyens de s'organiser collectivement ou individuellement. Certaines filières sont gérées par des éco-organismes, entreprises de droit privé agréées par l'État pour la gestion des écocontributions au nom des entreprises du secteur. Un exemple d'éco-organisme est la société CITEO²² créée pour la gestion des déchets issus des emballages ménagers et des papiers graphiques. Il existe aujourd'hui plus de 20 éco-organismes, pour la plupart soumis à un agrément de l'État.

La démonstration de l'utilité du dispositif REP a été faite et ni son existence, ni son fonctionnement ne sont aujourd'hui remis en cause. La modulation des écocontributions et la mise en place récente des bonus à l'incorporation de matières recyclées peuvent être des leviers forts. Ces mesures, à condition d'être vraiment incitatives ou dissuasives, encourageant les fabricants à éco-concevoir leurs produits afin qu'ils utilisent moins de matière, aient une durée de vie plus longue et soient recyclables. La liberté est laissée aux producteurs pour trouver les moyens optimaux d'atteindre leurs objectifs. La gouvernance des filières REP est ainsi un élément essentiel pour maintenir la qualité et le temps nécessaire au dialogue au sein de chaque filière.

21 Voir : « La REP quésaco ? La responsabilité élargie du producteur (REP) et la loi AGECE », Institut national de l'économie circulaire, 2021. Source : <https://institut-economie-circulaire.fr/wp-content/uploads/2020/12/publication-inec-rep.pdf>

22 Voir : <https://www.citeo.com>

Chaque filière s'organise en trois « segments » (ou « étapes de la chaîne de valeur ») : la collecte, le tri et la valorisation (qui peut être énergétique ; sinon, on parle de recyclage). On y trouve une diversité de technologies de recyclage (mécanique, chimique...), chacune d'elles faisant appel à des opérateurs différents, même si certains opérateurs couvrent l'ensemble de la chaîne.

Avec son (ou ses) éco-organisme(s) dédié(s)²³ et sa gouvernance spécifique, chaque filière a un poids considérable dans l'organisation de la collecte des produits en fin de vie sur le marché. Chacune est, finalement, un cas particulier pour la collecte, le tri et la valorisation.

Compte tenu de l'importance des filières REP, la consultation de l'ensemble des parties prenantes est essentielle à la fois pour anticiper la création de nouvelles filières et pour définir les périmètres des filières. Parmi les éléments à prendre en compte sont la pertinence et la clarté des périmètres à la fois pour les industriels du recyclage et pour les usagers et consommateurs concernés.

Une liste complète des différentes filières REP actuelles, classées par filière et date de création, se trouve en *Annexe 1* du présent rapport. Afin d'illustrer la portée et l'intérêt des différentes filières REP, on en décrit ci-dessous brièvement quelques-unes avec une rapide indication de leurs spécificités.

– **Emballages ménagers et papiers graphiques**

Il s'agit d'un secteur particulièrement complexe, et le travail de l'éco-organisme (CITEO) est certainement un des plus difficiles. À ce sujet, la mise en place de « gestes de tri » à la source est très importante. Les consignes de tri varient beaucoup entre pays, régions et même municipalités. Un travail de comparaison approfondi est en cours à CITEO et à l'ADEME. En plus de CITEO, deux autres éco-organismes

23 Sur certaines filières il existe plusieurs éco-organismes.

(LEKO²⁴ et ADELPHE²⁵), de démarrage plus récent, sont actifs sur cette filière.

– **Bâtiment et travaux publics (BTP)**

Cette filière est en cours de restructuration. Quelques évolutions récentes sont présentées plus loin dans le présent rapport (*Chapitre quatre*).

– **Véhicules hors d'usage (VHU)**

La filière VHU n'est pas uniquement française mais a été créée avec une portée européenne. La filière n'a pas d'éco-organisme, mais une gestion réalisée par les entreprises de mise sur le marché elles-mêmes, à titre individuel. La collecte des VHU se fait à 20 % au niveau des réseaux de vente et de réparation et est financée par les constructeurs avec des stratégies de remise sur le marché d'occasion en France ou dans d'autres pays. Les centres VHU agréés par les préfectures collectent tous les types de VHU (réseau des constructeurs, assurances, particuliers, fourrière). Ils développent une activité de démontage et de revente de pièces détachées et procèdent au démontage de matières pour le recyclage (verres, faisceaux de cuivre, plastiques). Enfin, le broyage des automobiles intervient ensuite avec des tris de matière plus ou moins automatisés. La composition en différentes matières des différents véhicules évolue rapidement en raison des règles environnementales et des volontés d'allègement ou d'électrification, ce qui conduit à des difficultés au niveau du tri des matières et peut affecter la rentabilité des installations qui se financent surtout par la revente de métaux. L'arrivée des véhicules électriques ou hybrides va amener à une remise à plat de certaines pratiques de la filière (due, entre autres, à la dangerosité du traitement des batteries).

– **Batteries et piles ; pneumatiques**

Les cas des batteries (COREPILE et SCRELEC) et des pneumatiques (ALIAPUR et FRP) font l'objet d'une filière spécifique. Les nouvelles batteries au lithium modifient notamment la donne et nécessitent la

24 Voir : <https://www.leko-organisme.fr>

25 Voir : <https://www.adelphe.fr>

mise au point d'une filière encore plus particulière²⁶. À ce sujet, plusieurs projets sont actuellement soutenus dans le cadre du programme France 2030²⁷.

- **Équipements électriques et électroniques**

Le cas de la filière des DEEE (déchets d'équipements électriques et électroniques) est particulièrement complexe. Une analyse est présentée plus loin dans le présent rapport (*Chapitre trois*).

- **Bateaux de plaisance**

Parmi les nombreuses autres filières REP, on peut noter la mise en place d'une filière spécifique pour les bateaux de plaisance et de sport qui est en train de déployer sa propre filière de recyclage avec l'éco-organisme APER²⁸. On voit bien, à ce sujet, les interactions qu'une telle filière pourrait avoir avec le recyclage de matériaux similaires, principalement composites, tels ceux qui constituent des pales d'éolienne ou des capots de certaines voitures, par exemple. Comme souvent, il peut y avoir des interactions importantes entre filières d'une part et entre différents types de matériaux, d'autre part.

Limites de l'organisation par filière REP

Comme indiqué ci-dessus pour le cas des bateaux de plaisance, une difficulté majeure dans l'organisation REP pour le recyclage est l'intersection des filières et des différents types de matériaux. Il y a, en effet, les mêmes matériaux dans plusieurs filières REP et, à l'inverse, plusieurs matériaux dans une même filière REP. À titre d'exemple, presque toutes les filières sont concernées par la valorisation des plastiques. Les professions de la

26 Voir : rapport du CSF Mines et métallurgie au sujet du recyclage de lithium : <https://pfa-auto.fr/wp-content/uploads/2019/06/PTF-Recyclage-batterie-lithium.pdf>

27 Voir : <https://www.ecologie.gouv.fr/france-2030-annonce-des-laureats-recyclage-des-batteries-lappel-projets-recyclage-recyclabilite-et>

28 APER : Association pour la Plaisance Éco-Responsable : éco-organisme national agréé pour la gestion de la déconstruction et le recyclage de bateaux de plaisance et de sport (voir : www.recyclermonbateau.fr)

collecte et du tri se trouvent alors face à des flux de matière qui sont, par nature, multi-matériaux et multi-filières. Une vision où chaque filière serait complètement indépendante des autres trouve vite ses limites. Si la subsidiarité par filière est une nécessité, il n'en reste pas moins que l'objectif poursuivi est finalement la construction d'un véritable système industriel connectant les filières en entrée et les entreprises de valorisation en sortie. À trop segmenter par filière, on risque de perdre la cohérence industrielle.

L'État, conscient des difficultés liées à ces chevauchements, a mis en place une « Commission inter-filières REP » (CiFREP) se réunissant en formation transversale pour assurer une harmonisation entre l'ensemble des filières. Cette commission s'occupe essentiellement de la consultation sur des textes réglementaires en cours de préparation, suite à la forte priorité mise par l'État sur l'économie circulaire.

Toutes les filières REP sont concernées. Les professions de la collecte, du tri et de la valorisation des matières sont représentées par la Confédération des métiers de l'environnement (CME), où sont rassemblés la Fédération nationale des activités de la dépollution et de l'environnement (FNADE), la Fédération professionnelle des entreprises du recyclage (FEDEREC) et le Syndicat national des entrepreneurs de la filière déchet (SNEFID). La Fédération des entreprises de l'insertion (FEI) y est également représentée. Les éco-organismes, en revanche, ne sont pas membres de la CiFREP.

Importance du dialogue technique entre opérateurs

Alors que la CiFREP a toute sa place en tant qu'instance de consultation sur les textes réglementaires, elle n'est pas le bon lieu pour s'occuper de la vision transversale économique et technologique pour la construction d'un véritable système industriel performant. En fait, la discussion technique entre les différents acteurs impliqués dans la construction des systèmes industriels se fait plutôt au niveau des comités stratégiques de

filière (CSF), avec une place particulière pour le comité stratégique de transformation et valorisation des déchets (TVD).

Le dialogue technique entre opérateurs et éco-organismes est aussi organisé par l'État qui peut faire obligation aux éco-organismes, au moment de leur agrément, de créer des comités techniques opérationnels (CTO). Par ailleurs, des réunions inter-filières permettent d'aborder certains des sujets technico-économiques transversaux évoqués ci-dessus, et cette approche essentielle est à encourager fortement.

1.3. INNOVATION TECHNOLOGIQUE

L'innovation technologique est évidemment un des éléments essentiels de l'amélioration de l'efficacité. Elle se retrouve dans toutes les étapes du cycle :

- la collecte
- le tri
- la préparation pour utilisation comme matière première
- l'adaptation des produits à l'utilisation de matières recyclées

Automatisation et optimisation de la collecte et du tri

Des groupes industriels comme Suez, Veolia, Paprec, GDE ou Derichebourg, ainsi que la plupart des PME du recyclage, proposent des services pour absorber les flux de déchets auprès des entreprises et des collectivités locales. Elles proposent en particulier beaucoup de moyens informatiques pour optimiser la collecte en minimisant la logistique. Ceci inclut la logistique inverse permettant de charger les camions à l'aller comme au retour, pourvu que les flux d'information circulent bien entre collecteurs, trieurs, fournisseurs de matériaux, producteurs de produits finis, etc. Tous les camions pourraient ainsi être reliés par des applications sur smart-

phone optimisant la collecte en temps réel grâce à une connexion avec les systèmes informatiques des entreprises et des collectivités locales. Ces sujets ont été étudiés dans le cadre du CSF TVD.

Ces sociétés conçoivent des solutions intelligentes de collecte des déchets, telles que l'introduction de capteurs électroniques et l'automatisation progressive des processus. Ceci se fait assez bien pour des entreprises, mais est plus difficile pour les collectivités de petite taille. Pour les municipalités de taille suffisamment importante sont aussi proposées des solutions intelligentes capables d'améliorer la maîtrise des flux et de responsabiliser citoyens et entreprises, afin de mieux valoriser les déchets et d'en réduire les nuisances. Ainsi, la tarification incitative, rendue possible par l'installation de puces sur les conteneurs et la distribution de badges pour l'accès aux points de dépôt volontaire, permet une hausse des volumes de déchets triés et une baisse du coût de la collecte par habitant²⁹.

Pour l'étape de tri, les entreprises développent aussi de nouvelles techniques pour trier les matières par vibration, gravité ou magnétisme. Une difficulté à signaler à ce propos concerne l'ouverture des sacs poubelles de façon à éviter les pollutions organiques. À ce sujet aussi, des solutions innovantes existent³⁰.

Déchets organiques issus d'ordures ménagères

Pour ce qui concerne les déchets organiques, les déchets verts des ménages (issus de la taille et de l'entretien des jardins) font déjà l'objet en général d'une collecte dédiée (grâce notamment aux ramassages spécifiques et aux bennes mises à disposition dans les déchetteries). Les biodéchets de cuisine, en revanche, vont souvent dans la poubelle « traditionnelle » (en général de couleur grise ou verte selon les localités) et se trouvent mélangés avec une quantité significative d'autres objets, notam-

29 Voir : « Communiquer sur la tarification incitative » (Guide, ADEME Editions, 2014)

30 Voir, par exemple, les procédés de la société 3Wayste (lauréat du prix de l'innovation en 2019) : <https://3wayste.com>

ment des emballages. Le contenu de cette poubelle fait alors essentiellement l'objet d'une incinération ou d'une mise en décharge, alors qu'on y trouve beaucoup de déchets qui pourraient être recyclés (plastique, papier, aluminium...), dont notamment les biodéchets de cuisine qui pourraient être valorisés sous forme de compost ou de biogaz, avec un marché potentiellement suffisant pour les accepter.

Le choix actuel de l'État consiste à favoriser le tri des biodéchets des ménages à la source, dans le respect des prérogatives des collectivités locales. L'échéance souhaitée par l'État pour ce tri à la source est fixée au 1^{er} janvier 2024. L'Union européenne avait demandé d'accélérer à 2023, mais cela a paru bien difficile à atteindre compte tenu des investissements nécessaires.

Afin d'inciter les particuliers à n'utiliser la poubelle « traditionnelle » que lorsque d'autres options de tri ne sont pas possibles, une charge financière des ménages pour la poubelle « traditionnelle » est envisagée (notamment via une taxe incitative de type TEOMi).

Malgré le tri à la source des biodéchets, il subsistera toujours des cas de biomasse intimement liée à son contenant (par exemple, des couches jetables ou certains emballages alimentaires souillés), mais le volume de ces cas plus complexes devrait être limité.

Pour ce qui concerne les ordures ménagères résiduelles (qui se trouvent encore dans la poubelle « traditionnelle »), les innovations technologiques peuvent permettre de traiter les déchets organiques qui y sont associés. En effet, il y a dans ces ordures résiduelles beaucoup de choses de nature différente : par exemple, des coquilles d'œuf ou d'huitre. Néanmoins, l'ensemble peut souvent servir à produire du biogaz ou du compost mais, même pour ces applications, on ne peut pas prendre n'importe quel inérant et des techniques de tri sont ainsi développées dans ce but.

De façon générale, lorsque les déchets organiques ont pu être minimisés, il reste à trier dans les ordures résiduelles des objets divers qui se trouvent mélangés. Certains d'entre eux peuvent être dangereux pour la santé du public ou des travailleurs ou tout simplement pour l'environnement. C'est pourquoi, la législation oblige à envoyer certains produits vers

des opérations de traitement spécifiques. C'est le cas, par exemple, pour les huiles des automobiles ou les liquides des réfrigérateurs. Le cas des batteries, notamment au lithium, relèvent de la même logique. *De facto*, il reste malgré tout une quantité importante d'objets relativement petits qui se retrouvent dans les poubelles « généralistes » et qui peuvent présenter un danger. Plusieurs cas d'incendies de camions ou de bennes ont eu lieu, et ce sujet est plus particulièrement discuté plus bas dans le cas des petits DEEE en mélange.

Une fois les produits spécifiques enlevés, il reste un volume très important de matières relativement peu contaminées par les déchets organiques et qui ne présentent pas de danger particulier. Pour ce volume de déchets, le choix technologique repose sur le broyage ou non avant tri du contenu des poubelles. Les deux solutions existent et fonctionnent, même si le tri sans broyage est encore rare. Pour les cas où le traitement commence par une opération de broyage, cela suppose la possibilité de mesurer rapidement ces déchets broyés pour les séparer suivant le type de matière : différents types de métaux, de plastiques, de minéraux ou autres polymères.

Étant donnée la complexité des opérations de collecte et de tri, les industriels du recyclage préfèrent souvent travailler avec d'autres industriels qui disposent, pour le tri des matières à la source, de compétences spécifiques allant par exemple jusqu'au type de plastique ou d'alliage métallique. Pour des flux plus mélangés comme ceux issus des ménages, des méthodes de tri de plus en plus automatisées, par exemple par méthode optique, existent et sont commercialisées (par exemple, le procédé SALTO de Veolia³¹ qui serait à même d'identifier jusqu'à 14 matériaux différents sur un même tapis ou les équipements de la société Pellenc ST³², spécialiste mondial du tri par mesure infra-rouge).

D'autres techniques de tri par méthode physique (telles que la technique de spectroscopie par rayons X (RX) ou la spectroscopie d'émission optique de plasma créé par laser (LIBS), par exemple) sont prometteuses.

31 SALTO : sequential adaptive loop technology
(source : <https://www.veolia.com/fr/solution/automatisation-tri-emballages-recyclables>)

32 Voir : <https://www.pellencst.com/fr/>

À titre d'exemples, on peut citer le tri d'aluminium suivant la teneur en silicium³³ ou le tri des plastiques suivant la teneur en chlore ou en fluor. On peut également citer la possibilité de trier les métaux ou les plastiques en fonction de leur composition chimique plus détaillée. Il serait ainsi possible de trier les plastiques en fonction de leur charge minérale ou bien d'associer des lots de ferrailles bien caractérisés pour réaliser des alliages particuliers en évitant de recourir à des minerais rares et chers tels que molybdène, nickel ou terres rares.

Même si la rentabilité de certaines de ces techniques reste à assurer, elles ont cependant un potentiel réel de développement en termes de coût et de qualité. Les investissements associés n'étant pas négligeables, il faut pouvoir les justifier par des flux de matière à traiter dans chaque catégorie concernée qui sont à la fois prévisibles et suffisants en quantité.

La récupération des matières pour les réutiliser dans les filières de fabrication habituelles nécessite souvent d'aller au-delà du tri par voie mécanique et mesure à la volée. C'est ainsi qu'est en train de se mettre en place de manière industrielle des voies chimiques de séparation pour les polymères. De même, des opérations de thermométallurgie et/ou d'hydro-métallurgie sont utilisées pour séparer plus finement les métaux, comme le fait par exemple la société Umicore pour les métaux.

Pour le cas particulier des collectivités locales, les services fournis par les industriels couvrent la collecte et les étapes de tri des matières. Certaines collectivités se sont ainsi dotées d'usines modernes permettant de traiter de grandes quantités de déchets (par exemple, à Carcassonne, à l'île de Man ou à Rotterdam³⁴) mais aussi de centres de collecte où l'usager ne fait qu'un arrêt pour se débarrasser de ses déchets et où les erreurs de tri sont minimisées par différentes techniques (visuelles, électroniques ou autres).

33 au-delà de la technique actuelle de tri des produits à base d'aluminium par machines à courants de Foucault

34 Voir : <https://www.amcsgroup.com/fr/communiques/rotterdam-opte-pour-la-plate-forme-informatique-d-amcs/>

Perspectives d'innovation dans de nombreux secteurs

Un grand nombre de projets pilotes expérimentaux ont été menés et offrent des perspectives intéressantes. Dans le domaine opérationnel du BTP, par exemple, les groupes Suez et Bouygues ont mené en collaboration un projet pilote appelé NextMat³⁵ de déconstruction sélective d'un bâtiment de 4 800 m² à Neuilly, dans un espace contraint avec une seule benne disponible sur site et a obtenu un taux de valorisation de la matière supérieur à 70 %. Suez a aussi élargi l'application de Building Information Modelling (BIM), bien connue du secteur BTP, au cas de la déconstruction³⁶.

Également dans le cadre des innovations liées à l'éco-conception, l'éco-organisme CITEO a créé en juin 2018 le service FEEL³⁷, un outil en ligne, simple et rapide, pour toutes les entreprises qui souhaitent améliorer la performance environnementale de leurs emballages et papiers et optimiser leur contribution à l'économie circulaire. FEEL capitalise sur les spécificités sectorielles du produit et permet de disposer d'un diagnostic et d'un plan d'action de l'éco-conception.

Les initiatives et les domaines ciblés par les projets d'innovation sont ainsi très nombreux. La fédération professionnelle des entreprises du recyclage (FEDEREC)³⁸ a recensé en 2017 une liste non exhaustive de projets et d'initiatives qui donne un aperçu de l'activité du secteur (voir *Annexe 2*).

Afin d'encourager de nouveaux développements, des appels d'offre à l'innovation technologique, tant au niveau de la collecte que de l'éco-conception, sont fréquemment organisés par l'ADEME et par les éco-organismes comme CITEO ou ECOSYSTEM et permettent de trouver des financements d'amorçage pour les approches les plus innovantes.

35 Voir : <https://www.suez.com/fr/notre-offre/succes-commerciaux/nos-references/suez-realise-avec-bouygues-premier-chantier-francais-deconstruction-en-espace-contraint-neuf-flux-de-tri>

36 Voir : <https://www.suez.com/fr/notre-demarche-bim-accompagnement-toutes-etapes-projets-clients>

37 FEEL : Facilitateur d'éco-conception en ligne (voir : <https://feel.citeo.com>)

38 Voir : <https://federec.com>

En effet, ces innovations seront importantes pour l'avenir. Elles doivent pouvoir se développer sur le long terme, grâce à des soutiens de cette sorte. Au-delà de l'étape de preuve des concepts, une organisation économique du marché par l'État (subventions d'investissements, fiscalité adaptée, éco-contributions, matière recyclée obligatoire dans les produits, etc.) est une nécessité pour aller jusqu'au stade industriel. L'État s'attache à encourager l'innovation au travers de différents mécanismes aux différents niveaux de maturité des innovations jusqu'à atteindre l'industrialisation effective.

1.4. ÉCO-CONCEPTION, SYSTÈMES INDUSTRIELS ET FORMATION

Nécessité de bases de données pour l'éco-conception

Les possibilités offertes par l'éco-conception sont considérables et devront être développées davantage. Dans les logiciels d'éco-conception disponibles actuellement, il y a des modules concernant le recyclage des différents composants. Pourtant, au-delà du design classique permettant de mieux agencer les différents éléments pour améliorer le démontage, la déconstruction ou la démolition, il est nécessaire de simuler ce qui se passera au cours du recyclage des matières en fin de vie. Ceci suppose une description fidèle des étapes de procédés utilisées pour, in fine, valoriser la matière, l'incinérer ou la mettre en décharge.

La comparaison objective entre ces différentes solutions doit être évaluée grâce à des logiciels adaptés comme toute autre étape au cours de la fabrication, de la logistique et de l'utilisation en service. Le point critique de ces analyses est la disponibilité de données validées. Les comparaisons demandent en effet une quantité gigantesque de données concernant les principales entrées et sorties des différents processus de recyclage, de façon à faire les bons choix et pouvoir effectuer des analyses de cycle de vie (ACV) complètes du berceau au berceau. La construction de bases de données indépendantes, certifiées et fiables, est ainsi un aspect indispensable pour l'industrialisation de cette démarche.

Rôle essentiel des systèmes industriels

Le facteur clé de réussite pour la réalisation des boucles incluant l'ensemble des étapes, comme évoqué ci-dessus, est la mise en place de véritables systèmes industriels. Cela suppose d'avoir des industries puissantes capables de développer les technologies nécessaires, en y associant un tissu de PME et d'associations d'économie solidaire. Toutes les organisations ont leur place, mais la présence de quelques grandes entreprises innovantes sera une nécessité dans la concurrence internationale des technologies qui ne va pas manquer de se mettre en place. À ce titre, la réglementation nationale doit permettre d'éviter les freins à l'innovation et au maintien du *statu quo ante*. Cela nécessite une approche réglementaire suffisamment souple et adaptable pour que les entreprises innovantes françaises puissent se développer au niveau national et conquérir les marchés à l'international.

Le comité stratégique de filière (CSF) de la filière «transformation et valorisation des déchets» (TVD) a mis en place des partenariats entre des start-up du secteur et les entreprises de traitement des déchets. La France est plutôt bien placée actuellement, même si l'Allemagne devance souvent la France dans le domaine des équipements et machines de tri, par exemple.

Un «système industriel» performant doit comprendre les éléments suivants :

- **la collecte**, avec comme principale difficulté la collecte des déchets ménagers : l'enjeu consiste à faire en sorte qu'il y ait à la disposition des particuliers un accès facilité aux lieux de stockage intermédiaires (poubelles dédiées, bennes en déchetterie,...) nécessaires au tri d'une diversité de matières, dont, entre autres, une part de biomasse compostable, des emballages et objets très souillés, des objets dangereux et des objets peu souillés et peu dangereux. Le système de collecte doit tenir compte de ce qui est acceptable en entrée des lignes de tri, ainsi que de ce qui est miscible sans trop de risque. Ceci nécessite un vrai dialogue technico-économique entre les acteurs et parties prenantes, dont les collectivités territoriales et les usagers/particuliers.

- **le tri**, pour lequel certaines des technologies nécessaires existent déjà et où d'autres sont en cours de développement.
- **la transformation** des matières, qui est à privilégier quand c'est possible, devant la valorisation énergétique par incinération, méthanisation ou chaudières CSR³⁹, la mise en décharge étant utilisée uniquement en dernier ressort.

Autour des acteurs directement opérationnels du système industriel (collecte, tri et transformation) vont graviter d'autres acteurs formant un écosystème économique plus large qui comprend, par exemple, les fabricants d'équipements, des entreprises de valorisation des matières, des associations, etc. Il faut donc une organisation économique appropriée, de façon à ce que les entreprises puissent dégager des marges « raisonnables » afin de pouvoir innover, tout en évitant la création de situations de rentes et de profits excessifs. À ce titre, l'État a un rôle essentiel à jouer non seulement en soutenant l'innovation, ce qu'il fait déjà au travers des financements du programme des investissements d'avenir (PIA) gérés par l'ADEME et le plan d'investissement France 2030, mais surtout, en s'intéressant au bilan économique et bilan carbone de chacune des boucles de matière. Cela nécessite de véritables développements en sciences économiques susceptibles d'aider à choisir entre les différents outils à la disposition de l'État et des collectivités locales.

Dans cette optique, il est important de noter que les différents flux de matière à recycler ne constituent pas des boucles totalement fermées. Pour chaque flux collecté et trié, il n'y aura pas nécessairement qu'une seule filière REP de « produit » concernée, ni une seule filière industrielle de « matériau ». En sus de ce qui peut être récupéré et recyclé, il y aura inévitablement des flux de refus de tri pour lesquels la filière « Combustible solide de récupération » (CSR) peut offrir des perspectives de valorisation économique.

39 Note : cette option s'entend avec un « vrai » combustible solide de récupération (CSR) constitué de déchets plastiques triés (et non pas d'ordures en mélange à faible pouvoir calorifique).

Importance de la formation et de la culture technique

Les systèmes industriels nécessaires à un recyclage efficace auront besoin de personnels qualifiés et devront s'intéresser en permanence, et en anticipation des évolutions technologiques, à la formation spécialisée des opérateurs, techniciens et ingénieurs indispensables à la bonne marche de l'ensemble des secteurs du domaine.

Ouvrir les boîtes noires des objets n'est pas seulement un procédé pédagogique qui permet de comprendre la composition et le fonctionnement des objets techniques, mais constitue également une activité essentielle à l'économie circulaire, activité potentiellement créative et productive grâce à la réutilisation et au reconditionnement d'objets en fin de vie. À ce titre, l'intégration des activités de démontage et de *reverse engineering* dans la formation des ingénieurs, techniciens et enseignants aurait beaucoup d'intérêt.

De façon plus générale, les initiatives de culture technique centrées sur les objets envisagés dans leur matérialité peuvent permettre de sensibiliser les consommateurs et les usagers aux coûts matériel, environnemental, humain et social de la fabrication des objets techniques comme de leur mise au rebut.

1.5. RECOMMANDATIONS

- **Favoriser l'émergence d'un dialogue social, technique et économique structuré au-delà de l'organisation REP** avec l'ensemble des acteurs de l'écosystème. L'enjeu d'un recyclage efficace nécessite la création d'un véritable écosystème industriel avec de grands acteurs industriels, des PME et des associations relevant de l'économie sociale et solidaire. Les orientations prises seront structurantes et le dialogue technico-économique avec les différents acteurs sera déterminant et dépassera l'organisation REP par REP qui est néanmoins indispensable. L'État doit pleinement jouer son rôle pour favoriser l'émergence de ce dialogue plus transversal et inclusif.

- **Promouvoir une vision transversale technique, économique et sociale entre les différentes filières, les industries du tri, du recyclage et les fabricants de matériaux** chargés de la valorisation in fine (sidérurgiste, verrier, plasturgiste...). Cette vision ne doit pas se substituer aux filières REP mais doit favoriser l'expertise et la recherche transversales entre filières, en particulier à travers les appels d'offre de l'ADEME et d'autres initiatives (Régions, PIA, Europe, consortia industriels, etc.)
- **Consulter l'ensemble des parties prenantes** pour anticiper la création de nouvelles filières REP et pour définir des périmètres des filières, en vue d'une amélioration de la pertinence et de la clarté des périmètres à la fois pour les industriels du recyclage et pour les usagers et consommateurs concernés.
- **Systématiser des analyses complètes et régulièrement révisées de cycle de vie et de bilan** des différentes voies de collecte, tri, valorisation et production, de façon à favoriser les solutions présentant les meilleurs bilans. Dans cette optique, développer une méthodologie partagée avec un regard scientifique de haut niveau indépendant des intérêts des acteurs économiques du secteur.
- **Créer un centre de compétence (éventuellement financé par des écotaxes) qui permettrait une véritable analyse des voies complètes de tri, de recyclage, des méthodologies d'éco-conception et d'expertises indépendantes** sur le sujet. Cette indépendance des différents acteurs est une nécessité pour alimenter les décisions à prendre. Cela pourrait aussi permettre de développer de nouvelles machines de tri, adaptées à certaines problématiques, sans être lié au bon vouloir des leaders du marché.
- **Développer des bases de données adaptées et harmonisées** pour l'éco-conception qui permettent de comparer clairement les différentes voies disponibles pour recycler ou valoriser les matières contenues dans un nouveau produit. Ces bases de données pourraient faire l'objet de procédures de certification, éventuellement réalisées par le centre proposé précédemment.

- **Mettre en place une recherche en science économique au meilleur niveau, avec une vision collective de sa validité.** La circularité recherchée pose de beaux défis à la science économique : comment concevoir un cycle où chaque acteur économique dégage une rentabilité suffisante pour pouvoir progresser sans création de situations de rentes et de profits excessifs ? Quelles modifications peuvent être introduites par l'État pour rendre le cycle vertueux ?
- **Mettre l'accent à l'endroit de la filière le plus pertinent** en fonction de l'objectif recherché :
 - **si l'objectif est de minimiser les déchets** ultimes dans l'environnement, il faut éliminer les objets non recyclables (ce qui est largement entamé, mais doit encore progresser), réduire les pertes lors de l'usage des objets (exemple des microfibres de plastique lors du lavage des vêtements synthétiques) et améliorer au maximum la collecte.
 - **si l'objectif est d'améliorer le bilan de CO₂**, il faut favoriser les produits récupérables à durée de vie longue ou très longue, optimiser la réutilisation/réparation, et comparer avec d'autres matières en termes de bilan carbone (y compris leur poids dans les transports tout au long de leur cycle de vie, qui est toujours favorable aux plastiques). Pour ce faire, une méthodologie d'analyse transversale et partagée est nécessaire.
- **Pousser les analyses et réaliser les études d'éco-conception dans l'optique d'associer une valeur environnementale certifiable à un produit** en fonction de sa conception.
- **Reconnaître juridiquement, dans les conventions collectives, les activités de démontage ou démantèlement** comme des métiers à part entière, de manière à assurer leur encadrement approprié (salaires, conditions de travail, santé au travail).
- **Intégrer des activités de démontage et d'éco-conception dans la formation** des ingénieurs, techniciens et enseignants.

- **Encourager les initiatives de culture technique centrées sur les objets envisagés dans leur matérialité** pour permettre de sensibiliser les consommateurs et les usagers, en particulier les jeunes dès l'école primaire.
- **Inciter au développement technologique et commercial de l'industrie française en matière d'équipements de tri et de construction d'usines de recyclage.** Un récent appel d'offre de l'ADEME dans le cadre du plan d'investissement France 2030 va dans le bon sens pour rattraper le retard de la France vis-à-vis de l'Allemagne, notamment dans le domaine des équipements de tri.
- **Optimiser le nombre de poubelles et de lieux de stockage intermédiaires au niveau de la collecte auprès des ménages.** Une poubelle ou un lieu de stockage par filière REP n'est pas possible, en raison de leur nombre. Il est par conséquent probable qu'il y aura des mélanges de flux entre filières. Ces mélanges doivent être regardés sur le plan économique afin de ne pas faire financer une filière par une autre et de laisser la maîtrise à chacun. Ce sujet peut varier en fonction de la géographie locale, en particulier à la ville ou à la campagne. La filière emballage est la plus importante dans ce contexte, mais elle n'est pas la seule.

Chapitre 2

PLASTIQUES ET COMPOSITES

2.1. PLASTIQUES

Cadre législatif relatif aux plastiques

La loi fixe un objectif global en matière de recyclage, toutes matières confondues, de 55 % des déchets non dangereux non inertes valorisés en 2020, et cet objectif passe à 65 % en 2025. Dans ce cadre, la valorisation des plastiques (dont des plastiques textiles et des plastiques d'emballage) constitue l'enjeu le plus important, car les autres déchets non dangereux non inertes (parmi lesquels les métaux, papiers, cartons et verres) ont aujourd'hui des taux de valorisation plus importants.

La loi TECV de 2015 contient plusieurs articles concernant l'économie circulaire en général et, plus particulièrement, la collecte, le tri et le recyclage des plastiques. Les objectifs de la loi sont déclinés opérationnellement dans le programme national de prévention des déchets (PNPD), mis à jour en 2021 pour la période 2021-2027⁴⁰. Le programme national prévoit une approche partenariale mobilisant l'ensemble des parties prenantes autour d'instruments diversifiés (outils réglementaires, démarches volontaires, sensibilisation et partage de l'information, commande publique, aides et incitations). Certains objectifs concernent les plastiques, notamment

40 Voir : <https://www.ecologie.gouv.fr/cadre-general-prevention-des-dechets>

l'axe 2: « Réduire les déchets marins, dont les pollutions dues aux sacs plastiques ».

Dans ce cadre, les plastiques sont interdits pour certains usages : interdiction de la mise sur le marché des sacs en plastique à usage unique : pour les sacs de caisse, dès le 1^{er} janvier 2016, pour les autres sacs (notamment les sacs « fruits et légumes »), le 1^{er} janvier 2017, sauf pour les sacs compostables et biosourcés, à condition qu'ils respectent une teneur minimale en matière compostable ou biosourcée (40 % en 2018, 50 % en 2020 et 60 % en 2025) ; les sacs oxo-fragmentables sont interdits, ainsi que le recours, après le 1^{er} janvier 2017, aux emballages plastiques non compostables pour l'envoi de la presse et de la publicité. Elle stipule également l'interdiction de la mise sur le marché des assiettes, verres et gobelets jetables de cuisine en plastique (sauf pour les ustensiles compostables et biosourcés) à partir du 1^{er} janvier 2020.

La loi AGEC de 2020 complète certaines dispositions de la loi TECV en exprimant une volonté de tendre vers l'objectif de 100 % de plastique recyclé d'ici au 1^{er} janvier 2025, et en ajoutant un certain nombre de dispositions qui concernent directement ou indirectement le recyclage des matières plastiques⁴¹, parmi lesquelles :

- une réduction de 15 % des déchets ménagers et assimilés et de 5 % des quantités de déchets d'activités économiques en 2030 par rapport à 2010
- une réduction de 50 % d'ici à 2030 du nombre de bouteilles en plastique à usage unique pour boisson mises sur le marché
- une extension progressive des consignes de tri à l'ensemble des emballages plastiques sur l'ensemble du territoire avant 2022, en vue, en priorité, de leur recyclage en tenant compte des prérequis issus de l'expérimentation de l'extension des consignes de tri plastique

41 NB : le pourcentage de plastique dans une tonne de déchets ménagers varie de 3 à 10 % en fonction de la qualité de la collecte sélective

initiée en 2011. Un descriptif des dispositions relatives à la consigne est présenté en *Annexe 3*.

Étant donné ce cadre législatif, les industriels de tous les secteurs n'ont d'autre choix que de remettre en question et repenser leurs emballages pour, non seulement, atteindre ces objectifs, mais aussi anticiper les prochains décrets. À ce titre, le premier décret « 3R » pour Réduction, Réemploi et Recyclage est déjà paru en avril 2021⁴². Si ce premier décret est non contraignant et ne fixe aucune interdiction pour le moment, il définit néanmoins des objectifs pour la période 2021-2025, afin de tendre vers la fin de la mise sur le marché d'emballages en plastique à usage unique d'ici à 2040. Les trois premiers objectifs indiqués dans le décret sont :

- 20 % de réduction des emballages plastiques à usage unique d'ici fin 2025
- 100 % de réduction des emballages plastiques à usage unique « inutiles » d'ici 2025
- une filière de recyclage opérationnelle pour tous les emballages en plastique à usage unique d'ici au 1^{er} janvier 2025

La valorisation énergétique est traitée à part : elle ne doit jamais se substituer à la prévention ou à la valorisation de la matière lorsque celles-ci sont possibles. Néanmoins, le développement du tri et du recyclage des déchets conduira à la production de davantage de refus de tri, dont une partie pourra être mise en forme de combustibles solides de récupération (CSR).

Dans cet ensemble législatif et réglementaire, il convient de souligner la problématique particulière relative aux plastiques à usage unique. La di-

42 Décret n° 2021-517 du 29 avril 2021 relatif aux objectifs de réduction, de réutilisation et de réemploi, et de recyclage des emballages en plastique à usage unique pour la période 2021-2025

rective européenne à ce sujet⁴³ date de 2019 et introduit une obligation importante de réincorporation de plastiques recyclés (PET) dans les bouteilles. C'est pour tenir compte de cette exigence européenne que la loi AGECE introduit deux objectifs potentiellement contradictoires :

- 2025 : tendre vers 100 % de plastiques recyclés
- 2040 : abandonner toute production de plastiques à usage unique (les emballages notamment)

Ces deux objectifs sont potentiellement contradictoires, car il est bien difficile d'investir dans des lignes de recyclage des plastiques aujourd'hui (en vue de 2025) si la ressource est censée se tarir au plus tard en 2040. En voulant ainsi atteindre l'objectif d'abandon des emballages à usage unique en 2040, le risque est réel de ne rien atteindre, pas même du recyclage, pour cause d'insuffisance des investissements requis.

Plus généralement, on peut s'interroger sur l'objectif concernant l'abandon de l'usage unique des plastiques, car il n'est pas certain que l'utilisation d'emballages plastiques recyclables ou réutilisables soit toujours plus efficace écologiquement pour toutes les applications.

Chaîne de valeur complexe et imbriquée

Le cas du recyclage plastique est particulièrement complexe, car le plastique est utilisé dans presque toutes les filières, il y a une très grande variété de plastiques et la revente de matière n'est pas toujours rémunératrice, même si le marché évolue rapidement avec des augmentations de prix très importantes dans certains cas⁴⁴. En France, ce sont des PME et TPE qui font le tri de la matière. Coïncées entre les filières et les fabricants

43 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

44 le prix du rPET food grade en septembre 2022, par exemple, était supérieur à 2 000 €/tonne : <https://www.polyvia.fr/fr/Économie/prix-du-plastique-les-marches-du-pet-vierge-et-du-pet-recycle-sous-tension>

de matières neuves, elles ont de faibles marges et investissent peu, même si on peut noter un intérêt croissant des fabricants de matière neuve pour cet entre-deux.

Le marché mondial de matériaux plastiques atteint aujourd'hui plus de 500 millions de tonnes par an, comprenant non seulement des polymères fonctionnels (23 millions de tonnes annuelles) et structurels (370 millions de tonnes annuelles), mais aussi des produits en caoutchouc (30 millions de tonnes annuelles) et des fibres synthétiques (plus de 80 millions de tonnes annuelles). La production de plastiques a augmenté d'environ 35 % les dix dernières années et devrait croître jusqu'à 700 millions de tonnes annuelles d'ici 2030. Sur les vingt dernières années, la demande de matériaux plastiques a augmenté à un taux d'environ 5 % par an⁴⁵.

Sur le gisement théorique de déchets plastiques « post-consommation » en Europe, 27 millions de tonnes de déchets plastiques sont collectés annuellement. Un tiers de la collecte est recyclé et deux tiers sont incinérés ou mis en décharge⁴⁶. Encore, ce chiffre inclut-il probablement une part significative de déchets « post-production » (chutes). Un recensement des gisements de déchets plastiques pouvant être traités par recyclage chimique et physico-chimique en France a été établi en novembre 2022 par l'ADEME⁴⁷.

Les revenus de la filière dépendent du prix du pétrole en raison de la concurrence entre matières premières vierges et matières premières recyclées. De plus, il y a des interférences entre les prix des différentes matières (par exemple : pour les véhicules hors d'usage (VHU), où ce sont les prix des métaux qui tirent le marché). Ainsi, le démantèlement des matières plastiques dans la filière VHU n'est pas effectué dans un grand nombre de cas pour des raisons économiques, le ratio valeur/coût du travail étant trop faible.

45 <https://www.plasticseurope.org/en/resources/publications/4312-plastics-facts-2020>

46 <https://www.plasticseurope.org/en/resources/publications/4312-plastics-facts-2020>

47 <https://librairie.ademe.fr/dechets-economie-circulaire/5955-gisements-de-dechets-plastiques-pouvant-etre-traites-par-recyclage-chimique-et-physico-chimique-en-france.html>

La complexité du croisement filières/matières contribue également à la difficulté. C'est le cas, par exemple, du polypropylène (PP) et du polystyrène (PS) dans les VHU ou de la valorisation des plastiques dans la filière des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE). Dans quelques cas toutefois, les technologies et les marchés peuvent être porteurs. C'est le cas, par exemple, pour les bouteilles en polyéthylène téréphtalate (PET) où des procédés de recyclage très efficaces existent et où les clients finaux, soumis à la pression législative et médiatique, sont souvent prêts à payer plus cher pour avoir des emballages recyclés. Pour cette filière, le goulot d'étranglement est la collecte et le tri pour la mise à disposition de paillettes de PET après élimination des colles et bouchons. S'il peut exister une surcapacité éventuelle aujourd'hui pour le recyclage mécanique du PET provenant de bouteilles et barquettes, elle ne devrait pas être très importante et représenterait surtout une anticipation sur la croissance des taux de collecte à venir. L'exemple du PET montre ainsi que l'économie circulaire peut être attractive dès lors que le circuit est organisé et qu'il existe un moyen de le soutenir économiquement.

Développements technologiques

En Europe en 2020, environ 50 millions de tonnes de plastiques ont été consommés, principalement pour les marchés des emballages (41%), du bâtiment et de la construction (20%) et de l'industrie automobile (9%). À quoi l'on devrait ajouter le secteur des textiles qui est également un consommateur important : les fibres de polytéréphtalate d'éthylène (PET) représentent deux tiers du marché des textiles, soit environ 70 millions de tonnes annuelles dans le monde.

Les approches actuelles destinées au recyclage des plastiques consistent en général en une préparation mécanique des matières, un tri par des méthodes mécaniques ou optiques et un traitement par la plasturgie classique. Voici un aperçu de la variété des technologies de recyclage.

- **Recyclage thermomécanique**

Le recyclage thermomécanique s'applique à des déchets ciblés et relativement homogènes, c'est-à-dire constitués très majoritairement

d'un seul type de plastique et donc de polymère. Les procédés consistent à réaliser des opérations de tri très poussé, lavage, broyage, voire extrusion⁴⁸, pour obtenir des granulés constitués d'un mono-plastique dont la qualité est suffisante pour permettre de créer le même objet initial (« recyclage en boucle fermée »). Ce recyclage en boucle fermée est limité en raison des nombreux additifs (colorants, pigments...) et de la dégradation des polymères lors de l'étape de mise en forme. Puisqu'en général ces contaminations ne peuvent pas être éliminées, on utilise le plus souvent la matière recyclée pour une application finale moins exigeante, ce qui s'appelle « recyclage en boucle ouverte ».

Un plastique est ainsi une matière complexe, constituée habituellement d'un polymère (par exemple du polyéthylène (PE), du polytéréphtalate d'éthylène (PET), du polychlorure de vinyle (PVC), etc.) et de nombreux additifs. La combinaison fréquente de ce plastique avec d'autres plastiques, voire d'autres matériaux (verre, métaux, etc.), pour concevoir l'objet final souhaité, accentue encore le degré de complexité des déchets à traiter. Ceci explique sans doute les limitations auxquelles se heurte aujourd'hui le recyclage thermomécanique (procédé très majoritairement employé à date pour le traitement des déchets) et pourquoi de nombreux regards se tournent aujourd'hui vers les diverses autres options proposées dont le recyclage chimique.

48 Pour le PET du moins, et aussi pour le polyéthylène, l'extrusion est toujours nécessaire. Pour le PET, l'extrusion s'effectue à une température de 270 °C, ce qui induit des coupures de chaînes qui peuvent altérer les propriétés mécaniques des objets finaux.

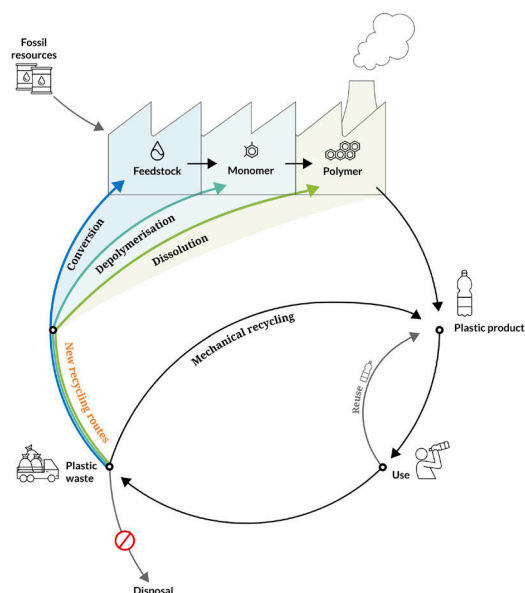


Figure 1: Recyclage thermomécanique et recyclage chimique.
(Source : Cefic-2022, <https://cefic.org/a-solution-provider-for-sustainability/chemical-recycling-making-plastics-circular/>)

– Recyclage chimique

À l'inverse du recyclage thermomécanique, le recyclage chimique a pour objectif de modifier la structure chimique d'un plastique (voir Figure 1 ci-dessus).

Cela inclut :

- **La dépolymérisation (par voie chimique ou biochimique) :** cette approche consiste à décomposer le polymère en récupérant ses monomères constitutifs. Elle dépend donc de l'énergie des liaisons chimiques qui lient les monomères entre eux, et elle s'appliquera par conséquent plutôt sur des liaisons de type « ester », voire amide, moins énergétiques que celles de type « carbone-carbone ». La caractéristique-clé de la dépolymérisation est que, contrairement aux procédés conventionnels, elle permet un grand nombre de recyclages des déchets concernés sans perte de qualité. En plus de la voie chimique, il existe aussi une voie biochimique de dépolymérisation impliquant des enzymes (catalyseurs biologiques) optimisées

dans ce but, voire des microorganismes produisant ces enzymes. Cette approche innovante, actuellement au stade du démonstrateur pour le PET, a l'intérêt d'un impact environnemental potentiellement plus faible, et de nombreuses jeunes pousses se lancent actuellement dans cette activité.

À un horizon plus lointain se profile une solution potentielle pour le PE, avec la très récente découverte dans la salive de teigne d'oxydases dotées d'activité dégradant ce plastique⁴⁹. La plupart des efforts de recherche et développement reste cependant focalisée sur le PET, qui est plus massifié dans la collecte post-consommation.

La dépolymérisation permet de revenir à un polymère recyclé de haute valeur ajoutée, mais uniquement à partir de flux post consommation bien définis et composés uniquement de thermoplastiques. Une approche alternative, toujours par voie chimique ou biochimique, consiste, non pas à produire le monomère d'origine, mais d'autres molécules valorisables dans l'industrie chimique, pharmaceutique ou de la production de molécules d'intérêt. Là aussi de nombreuses technologies dites de « up-cycling » sont proposées⁵⁰

⁵¹ ⁵²

- **La déformulation (souvent par dissolution) :** cette approche est relativement nouvelle et une optimisation est encore possible pour la

-
- 49 « Wax worm saliva and the enzymes therein are the key to polyethylene degradation by *Galleria mellonella* », A. Sanluis-Verdes, P. Colomer-Vidal, F. Rodríguez-Ventura, M. Bello-Villarino, M. Spinola-Amilibia, E. Ruiz-López, R. Illanes-Vicioso, P. Castroviejo, R. Aiese Cigliano, M. Montoya, P. Falabella, C. Pesquera, L. González-Legarreta, E. Arias-Palomo, M. Solà, T. Torroba, C.F. Arias, F. Bertocchini, doi: <https://doi.org/10.1101/2022.04.08.487620>
- 50 Voir Atkinson, Victoria, "Waste plastics unzipped into useful pieces", Chemistry World (Royal Society of Chemistry), 14 octobre 2022, <https://www.chemistryworld.com/news/waste-plastics-unzipped-into-useful-pieces/4016369.article>
- 51 Huan Chen, Kun Wan, Yayun Zhang, Yanqin Wang, Waste to Wealth : Chemical Recycling and Chemical Upcycling for a Great Future, <https://doi.org/10.1002/cssc.202100652> (16 mai 2021)
- 52 Ellis, L.D., Rorrer, N.A., Sullivan, K.P. et al. Chemical and biological catalysis for plastics recycling and upcycling. *Nat Catal* 4, 539–556 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41929-021-00648-4>

rendre plus rentable et plus respectueuse de l'environnement (par exemple, par l'emploi d'un solvant en milieu supercritique);

- **La conversion (par craquage, pyrolyse ou gazéification):** cette approche conduit à des matières premières liquides ou gazeuses (coupes hydrocarbures) que l'on peut réintégrer dans un complexe pétrochimique. Les procédés de conversion, dites « boucles longues », permettent d'élargir les flux de déchets chimiquement recyclables et sont complémentaires des procédés de dépolymérisation.

Cette effervescence technologique est un bon point et doit être encouragée, et de nombreux projets industriels sont déjà en cours de développement⁵³. Pour autant, il faudra, à un moment ou à un autre, faire des choix et organiser des filières techniques de recyclage pour les différents types de plastiques ayant des flux importants. Ceci supposera une intervention de l'État pour en assurer la pérennité, en fonction d'une analyse de cycle de vie et des perspectives économiques des technologies en développement. Dans cette optique, l'État s'implique avec de récents appels à projets d'investissements dans le cadre du programme France 2030 dans le domaine du recyclage des plastiques et composites⁵⁴.

Quant aux matériaux polymères de performance destinés aux applications de structure et de forme, l'industrie cherche à substituer aux matières thermodurcissables des thermoplastiques, car ces dernières peuvent être plus facilement fondues et sont ainsi beaucoup plus faciles à recycler. Les progrès dans cette voie sont constants, et il est probable que le bascule-

53 Voir : https://www.concertation-eastman-normandie.fr/docs/Le_dossier_de_concertation/Eastman%20-%20Dossier%20de%20concertation.pdf

Parmi les projets cités : 1) Saint-Maurice-de-Beynost (en dev.), Dépolymérisation — Toray Films Europe et Axens (80k t / an), 2) Clermont-Ferrand (en dev.), Conversion enzymatique — Carbios, 3) Semoy (2021), Solvolys — Dow et Orrion Chemical Orgaform (1,2k t / an), 4) Grandpruits (2023), Pyrolyse — Plastic Energy et TotalEnergies (15k t / an), 5) Longlaville (en dev.) Dépolymérisation enzymatique — Carbios et Indorama Ventures (50k t / an), 6) Notre-Dame-de-Gravenchon (2023) Pyrolyse — Plastic Energy et ExxonMobil (25k t / an), 7) Saint-Jean-de-Folleville (en dev.) Méthanolyse — Eastman (160K t / an), 8) Port-Jérôme - Loop Ind. et Suez - 70Kt/an procédé basse T° PET

54 Voir : <https://les-aides.fr/aide/aUYf3w/ademe/appele-a-projets-national-recyclage-des-plastiques-composites-et-elastomeres.html>

ment se fera assez rapidement pour certaines applications, notamment dans l'automobile. Le remplacement des thermodurcissables par des thermoplastiques concerne en particulier les matrices de matériaux composites (voir sous-chapitre ci-dessous relatif aux composites).

Les industriels investissent également de manière importante dans les plastiques biosourcés, et des applications commencent à apparaître. Le développement des plastiques biosourcés est néanmoins difficile dans certaines applications de très grande diffusion, où les coûts de production des matières synthétiques sont déjà très optimisés, notamment dans l'emballage.

Réglementation internationale relative à l'export de déchets plastiques

Sur le plan réglementaire, la France est amenée à mettre en place et à renforcer des mesures pour l'application d'un règlement européen récent⁵⁵ (entré en vigueur au 1^{er} janvier 2021) interdisant l'exportation de déchets plastiques non triés vers des pays non membres de l'OCDE, tels que la Malaisie, l'Indonésie, l'Inde ou le Vietnam. L'essentiel de ces mesures est déjà largement en place, car les pays concernés, ainsi que la Chine, refusent de recevoir les déchets en provenance de pays européens, et les sociétés européennes risquent aujourd'hui beaucoup en termes de réputation à exporter vers l'Asie.

De façon plus générale, les textes réglementaires encadrant les transferts transfrontaliers des déchets proviennent des décisions de la convention de Bâle, ouverte à la signature depuis le 22 mars 1989 (186 États signataires). Les textes se fondent sur l'interdiction d'exporter des déchets dan-

55 Règlement délégué (UE) 2020/2174 de la Commission européenne du 19 octobre 2020 modifiant les annexes I C, III, III A, IV, V, VII et VIII du règlement (CE) n° 1013/2006 du Parlement européen et du Conseil concernant les transferts de déchets

gereux ainsi que certains déchets plastiques⁵⁶ vers un État qui n'a pas donné son accord préalable. Les États-Unis ne sont pas signataires du traité, alors qu'ils sont parmi les plus gros producteurs mondiaux de déchets. Les obligations du traité s'appliquent cependant aux États-Unis de manière indirecte mais très concrète, dans la mesure où les partenaires commerciaux des États-Unis pour les flux de déchets sont tous membres de la convention de Bâle.

Il existe toutefois un risque de voir se développer le transfert de paillettes en plastique issues du recyclage dont le statut (déchet ou non) n'est pas toujours défini dans certains pays. Pour la France, en revanche, la situation est maintenant clarifiée, car la totalité des producteurs de paillettes a obtenu un agrément de « sortie de statut de déchet » (« end of waste status »⁵⁷) pour les paillettes, un agrément indispensable pour passer à l'étape de production de nouvelles matières (bouteilles, textiles, etc.).

2.2. COMPOSITES

Cadre législatif relatif aux composites

En 1999, la directive européenne 1999/31/EC fixe des règles sur la mise en décharge. Elle limite par exemple la mise au rebut des composés organiques. En 2000, la directive européenne sur les véhicules hors d'usage (2000/53/EC) fixe des règles pour le démantèlement, la réutilisation et

56 NB : les plastiques ne sont pas des déchets dangereux à proprement parler, mais à compter du 1^{er} janvier 2021, des amendements suivants ont été apportés à la convention de Bâle au sujet des déchets plastiques : 1) dans l'Annexe VIII, ajout d'une nouvelle rubrique A3210 qui précise les types de déchets plastiques considérés comme dangereux ; 2) dans l'Annexe IX, ajout d'une nouvelle rubrique B3011 qui remplace la rubrique B3010 qui précise les types de déchets plastiques considérés comme non dangereux et 3) dans l'Annexe II, ajout d'une rubrique Y48 qui concerne les déchets plastiques, y compris les mélanges de tels déchets sauf ceux qui sont dangereux. (source : Association internationale des douaniers francophones, <https://aidfdouaniers.org/la-convention-de-bale-concernant-les-dechets-plastiques-modifiee-au-1er-janvier-2021/>)

57 Voir : <https://www.ecologie.gouv.fr/differentes-categories-dechets>

la valorisation des véhicules en fin de vie. En 2015, elle fixe le taux de recyclage/réutilisation des VHU à hauteur de 85 %, 10 % de valorisation énergétique et 5 % maximum de mise en décharge. En France, le décret n° 2016-1840 implique la responsabilité élargie du producteur (REP) pour les bateaux de plaisance et de sport. Les véhicules et coques de bateaux étant formés de composites, cette directive implique indirectement leur recyclage. Pour les déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE), la directive fixant des objectifs à atteindre en termes de recyclage et de valorisation impose également le recyclage des composites⁵⁸. Ces lois et directives sont relativement récentes et nécessitent un développement des procédés pour le recyclage de composites. Il est à noter pourtant l'absence du mot « composite » dans la réglementation, les directives visant principalement des produits dont les gisements sont importants et non un matériau en particulier.

Matériaux composites : définition et contexte

Un matériau composite est un assemblage d'au moins deux composants non miscibles⁵⁹ et possédant des propriétés spécifiques (par exemple, résistance mécanique) que les composants pris indépendamment ne possèdent pas. Les composites sont constitués de trois éléments : une matrice, des renforts et optionnellement des additifs ou des charges. Il existe trois types de composites : les composites à matrice organique (CMO), les composites à matrice céramique (CMC) et les composites à matrice métallique (CMM), les premiers étant largement les plus utilisés.

58 P. Krawczak, « Recyclage des composites », Ref: TIP100WEB - « Plastiques et composites », juill. 10, 2011. <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/materiaux-th11/plasturgie-procedes-specifiques-aux-composites-42474210/recyclage-des-composites-am5895/> (consulté le 6 mai 2020).

59 « Introduction to Composite Materials | IntechOpen ». <https://www.intechopen.com/online-first/introduction-to-composite-materials> (consulté le 6 mai 2020).

La filière des composites génère deux types de déchets⁶⁰ : 1) les déchets à la production, avec un flux de déchets annuel plutôt stable, aisément triables et valorisables (environ 50 000 tonnes annuelles en Europe), 2) les déchets de fin de vie (environ 30 000 tonnes annuelles en Europe), dont les quantités augmentent de 5 à 10 % par an, difficiles à trier et à récupérer (par exemple, résidus de broyage de voitures).

Malgré le faible volume de déchets générés, leur recyclage apparaît comme potentiellement bénéfique au regard de leur coût de production pour certains composites (par exemple, les fibres de carbone ~25\$/kg⁶¹ en moyenne atteignant ~80\$/kg pour des applications liées à l'aéronautique⁶²), mais la faisabilité d'un tel recyclage dépendra fortement de l'application envisagée. Les fibres de carbone sont utilisées en général sous forme de fibres longues, souvent tissées. Les fibres longues seraient difficilement récupérables, mais la matière issue de recyclage pourrait éventuellement être utilisée sous forme de fibres courtes (après broyage) pour des applications moins exigeantes.

Composites non biosourcés : perspectives et limites du recyclage

De nombreuses entreprises ont pour activité le recyclage des composites en Europe. Les procédés les plus utilisés sont le broyage, la pyrolyse et la co-incinération. Les pays produisant les plus grands tonnages de composites sont les pays les plus avancés dans leur recyclage. Ainsi, l'Allemagne, leader en Europe, possède une dizaine d'entreprises. Certaines d'entre elles ont dû cependant fermer leurs portes, comme l'entreprise ERCOM, qui avait une capacité de 5 000 tonnes/an qu'elle sous-employait.

60 « FiberEUse - Large scale demonstration of new circular economy value-chains based on the reuse of end-of-life fiber reinforced composites-H2020-CIRC-2016 TwoStage ».

61 S. Nunna, P. Blanchard, D. Buckmaster, S. Davis, et M. Naebe, « Development of a cost model for the production of carbon fibres », *Heliyon*, vol. 5, n° 10, p. e02698, oct. 2019, doi: 10.1016/j.heliyon.2019.e02698.

62 N. Shama Rao, « Carbon Composites Are Becoming Competitive And Cost Effective », p. 12, 2018.

En 2017, le CRECOF⁶³ a estimé que les rebuts de production en France sont de 7 000 à 15 000 tonnes/an et les produits en fin de vie de 3 000 à 7 000 tonnes/an⁶⁴, d'où une production estimée entre 10 000 et 22 000 tonnes/an, alors que la capacité actuelle de recyclage est estimée à environ 4 000 tonnes/an. Le faible taux de recyclage résulte principalement de la diversité des composites ainsi que des difficultés dans la collecte et le tri en fin de vie.

Par ailleurs, il faut disposer d'un réseau de collecte et de tri afin d'alimenter les entreprises de recyclage. L'apport en matériau à recycler doit être relativement constant pour chaque entreprise afin d'utiliser de manière optimale la capacité de chacune. Bien sûr, les flux entrants et sortants doivent également être commensurables, ce qui exige une capacité à prévoir les demandes en fibres récupérées par des clients en aval. L'un des défis majeurs est d'anticiper les quantités à recycler dans le futur, en augmentant les capacités des entreprises ou en en créant de nouvelles.

De nombreux procédés existent pour le recyclage des composites⁶⁵. Alors que les composites en fibres de verre sont généralement recyclés par broyage, les composites en fibres de carbone (fibres qui supportent mieux la chaleur et ont un prix de revient plus élevé) sont recyclés principalement par des procédés thermiques. Le principal inconvénient des procédés actuels de recyclage réside dans le fait que les fibres recyclées perdent une partie de leurs propriétés mécaniques et donc ne peuvent être réutilisées pour les mêmes applications que les fibres vierges. D'où l'impossibilité d'atteindre l'idéal de réutilisation du matériau dans son usage initial afin de créer une boucle fermée.

63 CRECOF : le comité recyclage composites France, un collectif de pôles de compétitivité et d'organismes dont l'objectif est de faire émerger de manière effective des filières de recyclage des composites.

64 « Guide du recyclage des composites | Agrobiobase, la vitrine des produits biosourcés ». <http://www.agrobiobase.com/fr/dossier/guide-du-recyclage-des-composites> (consulté le 6 mai 2020).

65 G. Oliveux, L. O. Dandy, et G. A. Leeke, « Current status of recycling of fibre reinforced polymers : Review of technologies, reuse and resulting properties », *Progress in Materials Science*, vol. 72, p. 61-99, juill. 2015, doi : 10.1016/j.pmatsci.2015.01.004.

Un autre frein au développement des filières de recyclage est leur faible rentabilité. En effet, dans le cas des fibres de verre, les fibres vierges étant à très faible coût, leur recyclage ne représente que très peu d'intérêt. Le seul avantage que le fabricant pourrait tirer de l'achat de matériau recyclé plus cher dans ces produits serait l'image éco-responsable qu'il pourrait mettre en avant face au consommateur. En revanche, l'achat de fibres de carbone recyclées est intéressant du point de vue économique, en raison du prix de revient élevé de la production de ces fibres.

Concernant les composites à fibres de carbone, un recyclage hélicoïdal semble être une alternative possible. Le principe consiste à relier les secteurs aéronautique, automobile et des loisirs afin de faire circuler les matériaux composites en fonction des propriétés mécaniques requises. Dans le secteur aéronautique, par exemple, les composites thermodurcissables en fibres de carbone doivent être résistants aux impacts à forte vitesse. En revanche, dans le secteur automobile, cette résistance peut être moins élevée (moins de contraintes extérieures) et encore moins dans le secteur des loisirs. Ainsi est-il possible d'imaginer un composite en aéronautique qui en fin de vie sera recyclé (en perdant une partie de ses propriétés mécaniques) en vue d'une réutilisation dans le secteur automobile, moins exigeant.

Pales d'éoliennes : enjeu du passage des thermodurcissables aux thermoplastiques

Un enjeu de taille en matière de recyclage de matières composites concerne les pales d'éoliennes. En Europe, en 2025, la quantité de composites en fin de vie devrait quadrupler du fait des éoliennes, générant un flux de déchets significatif (de l'ordre de 30 000 tonnes/an entre 2020 et 2030) qui s'ajoutera aux déchets composites issus des bateaux de plaisance (10 000 tonnes/an).

En Europe, 77 000 éoliennes produisaient en 2018 une puissance électrique d'environ 155 GW⁶⁶. Le rôle stratégique de l'énergie éolienne concernant la transition écologique apparaît toutefois limité par la durée de vie relativement courte des installations (20 à 25 ans). Le matériau composite majoritaire actuellement dans la production des pales d'éoliennes est le « glass fiber reinforced plastic » (GFRP), dont la quantité utilisée est estimée à environ 12 tonnes/MW installé. Le volume de composites nouvellement installés en 2016 était de l'ordre de 150 000 tonnes (pour un volume total d'environ 1,9 millions de tonnes pour l'ensemble du parc). D'ici 2030, le besoin annuel en composites GFRP pour les infrastructures éoliennes dans l'Union européenne est estimé à environ 300 000 tonnes. Au regard des objectifs d'installation de nouvelles puissances offshore (1 000 GW) et onshore (5 000 GW) à l'horizon 2050⁶⁷, le recyclage de ces matériaux apparaît comme primordial. En effet, pour un volume estimé de 12 tonnes de composites par MW installé, une puissance totale installée en 2050 de 6 000 GW nécessitera 72 Mt de matériaux composites au total.

On estime que d'ici 2050 l'industrie éolienne européenne aura généré 43 Mt de matériaux composites en fin de vie. Pour la seule période de 2020 à 2025, on estime un démantèlement entre 3,9 et 4,8 GW de puissance installée, ce qui représente entre 48 000 et 58 000 tonnes à recycler. Comme c'est le cas plus généralement pour les polymères (voir remarque plus haut (*Paragraphe 2.1*) sur les développements technologiques des matériaux plastiques), la tendance est à la substitution des plastiques thermodurcissables par des thermoplastiques potentiellement plus facilement recyclables par voie thermique, chimique ou biochimique. Cependant, ces derniers n'ont pas encore les propriétés attendues et sont plus délicats à mettre en forme par certains types de procédés. L'extraction plus ou moins aisée des fibres du composite en fin de vie est une autre propriété à prendre en compte dans le choix des composants que sont la matrice, la fibre et les autres additifs. Il est probable toutefois que la problématique

66 J. P. Jensen et K. Skelton, « Wind turbine blade recycling : Experiences, challenges and possibilities in a circular economy », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 97, p. 165-176, déc. 2018, doi : 10.1016/j.rser.2018.08.041.

67 R. Fonte et G. Xydis, « Wind turbine blade recycling : An evaluation of the European market potential for recycled composite materials », *Journal of Environmental Management*, vol. 287, p. 112269, juin 2021, doi : 10.1016/j.jenvman.2021.112269.

engendrée par le recyclage déplace les compromis techniques actuels en favorisant davantage de thermoplastiques, mais ce sera une évolution au cas par cas.

Utilisation de matériaux biosourcés : perspectives et limites

Les composites biosourcés sont des matériaux composés d'une matrice et/ou d'un renfort issus de ressources naturelles. Les renforts sont généralement en fibres de chanvre ou de lin, ou issus de bois ou de bambou. Quant aux matrices, elles peuvent être en PLLA⁶⁸ par exemple, un biopolymère⁶⁹ obtenu à partir de l'amidon de maïs. Les bio-composites sont en plein développement et certaines questions peuvent émerger : les bio-composites sont-ils plus facilement recyclables que les composites actuels ? les bio-composites peuvent-ils remplacer les composites dans tous les secteurs ?

Leur intérêt principal est l'utilisation de matière renouvelable. De plus, la masse volumique des fibres végétales est inférieure à celle des fibres « classiques » de verre ou de carbone. Cette légèreté est un véritable atout dans la majorité des secteurs, et de fait leur utilisation est en pleine croissance dans le secteur automobile. Un autre avantage est le faible coût des fibres végétales, leur prix étant inférieur à celui des fibres de verre.

Cependant, certaines de leurs propriétés rendent leur usage limité. En effet, les résistances mécaniques et thermiques des fibres végétales étant très inférieures à celles des fibres de carbone, elles ne peuvent les remplacer. Il n'existe pas actuellement de filière pour le recyclage des bio-composites, car il n'y a pas de gisement assez important. Leur recyclage est possible par broyage mais les fibres récupérées sont alors dégradées.

68 PLLA ; acide L-poly lactique

69 R. Kueny, « Biocomposites : composites de hautes technologies en renfort de fibres naturelles et matrice de résines naturelles », thesis, Université de Lorraine, 2013. Consulté le : mai 06, 2020. [En ligne]. Disponible sur : <http://www.theses.fr/2013LORR0241>

Dans le cas des fibres cellulosiques, une fois celles-ci récupérées, il est possible de les recycler facilement en papeterie. La valorisation énergétique est également possible, les fibres naturelles ayant une capacité calorifique élevée de 15 MJ/kg, mais la valorisation de matière est toujours à privilégier. Dans tous les cas, l'analyse du cycle de vie des matériaux montre que, quel que soit le scénario de fin de vie, les composites biosourcés consomment moins d'énergie que les composites en verre/polyester.

2.3. RECOMMANDATIONS

- **Préconiser la limitation des mélanges entre plastiques différents** (pièces différentes, plastiques multicouches,...) et des éléments contaminants (colles, encres, colorants...) dans la fabrication des objets, afin de réduire les rejets du côté de la collecte industrielle.
- **Faciliter l'identification par des marqueurs** (étiquettes ou autres) permettant la reconnaissance des matières par les opérateurs.
- **Favoriser l'évolution des thermodurcissables vers des matériaux thermoplastiques** pour chaque application de matériaux de structure ou de forme où les propriétés mécaniques requises le permettent.
- **Indiquer quels sont les plastiques d'emballage vraiment compostables**, comme le prévoit la loi AGEC pour l'information aux consommateurs

Chapitre 3

ÉQUIPEMENTS ÉLECTRIQUES ET ÉLECTRONIQUES

Description de la filière

La filière des équipements électriques et électroniques (EEE) regroupe tous les appareils fonctionnant avec un courant électrique (ou en produisant un) ou avec des technologies utilisant le magnétisme. La tension est limitée à 1 000 V en courant alternatif et 1 500 V en courant continu. Les EEE regroupent des produits très différents par leur taille, leur fonction et leur composition. Lorsqu'ils atteignent le stade de déchets ils sont divisés en sept classes de déchets d'EEE (DEEE):

- **Classe 1:** équipements d'échange thermique, aussi appelés gros électroménager froid (GEF)
- **Classe 2:** petits équipements, écrans, moniteurs et équipements comprenant des écrans d'une surface supérieure à 100 cm²
- **Classe 3:** lampes
- **Classe 4:** gros équipements, notamment gros électroménagers blancs ou bruns, hors froid. (GEHF)
- **Classe 5:** petits équipements autres qu'informatiques et électroménagers (PAM)

- **Classe 6 :** petits équipements informatiques et de télécommunication (PEM IT). Cette classe est parfois regroupée avec la précédente pour constituer la classe des petits appareils en mélange (PEM)
- **Classe 7 :** panneaux photovoltaïques (PV)

Cette segmentation montre bien la complexité de la filière avec une hésitation inévitable entre une classification par taille et une par fonction, ainsi qu'une distinction entre ceux qui contiennent des fluides dangereux et les autres. Les statistiques de recyclage sont faites à partir de ces classes⁷⁰.

La France introduit une distinction supplémentaire entre les déchets qui proviennent de professionnels et ceux qui proviennent des ménages. L'ADEME a publié deux rapports détaillés en 2021 sur la structure du parc des EEE et du gisement des déchets comparée à la mise sur le marché et sur l'état de l'art de leurs traitements actuels⁷¹. Le montant annuel des mises sur le marché est un chiffre assez bien connu. Le parc est estimé à partir des différentes durées de vie des équipements (avec une fiabilité variable suivant la segmentation faite : 54 segments en l'occurrence). En connaissant les statistiques de recyclage et en les complétant par des sondages, on peut estimer un gisement de déchets qu'on pourrait recycler pour l'année en cours. Ce dernier chiffre est évidemment une estimation basée sur les hypothèses faites.

En 2019, le parc d'équipements EEE ménagers est estimé à 18 millions de tonnes (270 kg/habitant) et 4 840 millions d'unités (72 unités/habitant). Le gisement de déchets recyclables DEEE est, quant à lui, évalué à 1,8 Mt (dont 0,3 Mt pour les professionnels), soit 22,3 kg/habitant et 514 millions d'unités (7,7 unités/habitant). L'essentiel du gisement de déchets recyclables provient des ménages, et c'est pour cette raison que ce chapitre sera consacré surtout aux DEEE des ménages.

⁷⁰ D'ailleurs en cours d'évolution

⁷¹ Un rapport pour les ménages, un autre rapport pour les professionnels : Arthur Haarman (Sofies), David Rochat (Sofies), Elsa Raverdy (Sofies) : étude gisement D3EE, 2021.

On raisonne à la fois en masse et en unités car les gros équipements électroménagers pèsent lourd dans le gisement et biaisent les analyses. Le gisement ne croît plus que très doucement depuis 2017, probablement par suite de l'augmentation du recyclage.

Les mises sur le marché annuelles étaient d'environ 2,1 Mt en 2019, dont 83,1% dédiés aux EEE ménagers et 16,9% aux EEE professionnels. Ce tonnage annuel de mise sur le marché augmente de 3% par an environ, mais cette croissance est très variable en fonction des classes, avec, par exemple, 6% d'augmentation pour les panneaux photovoltaïques. Il serait fallacieux de comparer gisement de déchets recyclables et mise sur le marché pour la même année. En effet, à supposer que la durée de vie soit exactement de cinq ans, il faudrait comparer le gisement à la mise sur le marché cinq ans auparavant.

La filière REP des DEEE a été mise en place en 2006⁷², et elle a la particularité d'avoir, pour des raisons historiques, quatre éco-organismes: ECOLOGIC et ECOSYSTEM qui s'intéressent à presque l'ensemble du gisement, SCRELEC aux gros et petits équipements électroménagers et SOREN aux panneaux photovoltaïques. La classe des panneaux photovoltaïques est ainsi la seule à avoir son propre éco-organisme, les six autres classes pouvant être traitées par plusieurs éco-organismes. Une coordination nationale des éco-organismes de la filière a été mise en place.

En Europe et en France, la majeure partie des DEEE est réglementée par la directive DEEE (2012/19/UE) fixant notamment les objectifs de collecte et les taux de recyclage et de valorisation. En France, la loi AGECE du 10 février 2020 reprend ces objectifs en les précisant. Les mesures en sont progressivement déployées. Parmi ces dernières figurent les trois mesures suivantes impactant fortement le secteur des EEE:

- obligation de présenter un indice de réparabilité et de durabilité à partir du 1^{er} janvier 2021,

72 La première filière REP pour les emballages a été créée en 1993.

- interdiction de toute technique ou procédé empêchant la réparation ou le reconditionnement d'un objet, et
- création d'un fonds visant à soutenir et développer les activités de réparation et de réemploi.

Deux méthodes différentes sont utilisées pour le calcul de l'atteinte des objectifs européens :

- méthode n° 1 (utilisée depuis 2015) : l'objectif visé est d'atteindre le recyclage de 65 % de la masse des EEE mis sur le marché depuis les trois dernières années ;
- méthode n° 2 : l'objectif visé est d'atteindre le recyclage de 85 % du gisement de DEEE recyclables, en précisant la méthode utilisée pour estimer le gisement.

Comme l'indiquent les rapports de l'ADEME déjà cités, l'écart entre les objectifs fixés et le taux de recyclage constaté est différent si l'on utilise l'une ou l'autre méthode et suivant la classe choisie. Par exemple, pour les ménages, les écrans sont collectés à 87 % selon la méthode n° 1 (donc mieux que l'objectif de 65 %) mais à 37 % seulement selon la méthode n° 2 (donc bien en dessous de l'objectif de 85 %). À l'inverse, on trouve pour les panneaux photovoltaïques 7 % si l'on se réfère aux objets mis sur le marché, selon la méthode n° 1, contre 125 % si l'on se réfère au gisement, selon la méthode n° 2.

Les différences sont importantes en fonction des classes, mais si l'on considère l'ensemble des DEEE, les taux de collecte sont de 50 % avec la méthode n° 1 et de 52 % avec la méthode n° 2, donc très proches l'un de l'autre. Ces chiffres soulèvent encore beaucoup de discussions, car la notion de taux de collecte est délicate à mettre en œuvre concrètement, avec une difficulté supplémentaire due aux exportations plus ou moins contrôlées.

Grâce à des sondages auprès de 6 000 foyers, les rapports de l'ADEME précisent ce que les ménages font concrètement de leurs appareils en fin de vie. Environ 23 % sont réemployés, par un biais ou par un autre, à

l'exception des lampes qui ne sont pas réemployées. Pour la part mise au rebut, c'est à dire qui n'est pas réemployée, la situation est différente suivant la taille de l'équipement. Pour les gros équipements, la part mise en déchetterie ou reprise par un livreur, un magasin, un artisan ou autre professionnel est largement prépondérante : plus de 90 %. Pour les petits équipements, en revanche, la part des « mauvaises habitudes » (geste de tri inadéquat ou absent) déclarée par les répondants y est relativement faible, aux alentours de 10 %, même si elle atteint 14 % pour les lampes. Une comparaison de la part déclarée des DEEE mis dans les ordures ménagères avec les données issues de la campagne MODECOM⁷³ de 2017 suggère toutefois qu'il existe une sous-estimation importante dans les déclarations.

La collecte des petits équipements est un sujet important, car la fabrication des EEE de petite taille (par rapport au gros électroménager) nécessite davantage de matières premières qui sont peu ou pas produites en France. De plus, certains des matériaux utilisés dans les EEE sont qualifiés de stratégiques pour des raisons environnementales et géopolitiques. C'est le cas du néodyme, du samarium et du cobalt utilisés dans les aimants, et de l'indium dans les écrans tactiles des téléphones. Il conviendrait par conséquent de considérer certains DEEE comme une mine urbaine de métaux précieux (argent, or, platine, iridium). Par ailleurs, l'amélioration du taux de collecte de certaines classes d'objets doit constituer un objectif prioritaire, compte tenu de leur valeur. Une collecte efficace d'aimants Fe-Nd-B, par exemple, serait très utile, car il existe des procédés de recyclage ou de réutilisation directe après réusinage de tels aimants, mais une absence de collecte efficace créerait une dispersion des gisements et des concentrations trop faibles pour une récupération rentable.

73 MODECOM : MéthOde DE Caractérisation des Ordures Ménagère, est une méthode développée par l'ADEME permettant de déterminer les caractéristiques physiques et qualitatives des gisements de déchets. Elle permet d'évaluer le gisement de matières recyclables, notamment par type d'habitat.

Éclatement de la filière DEEE en de nombreux flux

La filière DEEE est vraiment particulière, parce qu'elle a été segmentée de façon assez hétérogène, avec la présence de plusieurs éco-organismes qui ont conduit parfois à une sous-segmentation. On parle de « flux » pour désigner le sous-segment d'une classe (par exemple, les jouets avec de petits moteurs). Cette sous-segmentation est rendue nécessaire du fait de la variété des applications, de la présence ou non d'éléments qu'il faut manipuler avec précaution (une pile rechargeable ou un liquide frigorigère, par exemple), d'une grande variété de tailles et d'une grande variété de composition en matériaux constitutifs : métaux, plastiques, verres spéciaux, terres rares, etc.

La tendance actuelle consiste à faire des lignes spécifiques par « flux ». À titre d'exemple, pour des réfrigérateurs, une opération technique permet de retirer les liquides frigorigères, puis une opération de broyage et de tri permet de récupérer les métaux et plastiques entrant dans la composition. Il existe une vingtaine de lignes de ce type en France ; plus le flux considéré est petit, moins il y a de lignes, avec pour conséquence une nécessité de transporter les objets en question.

On note cependant un rapprochement intéressant : le procédé suivi pour le recyclage des réfrigérateurs ressemble assez fortement à celui utilisé pour les véhicules hors d'usage (VHU) : retirer les matières inflammables, notamment les huiles, effectuer certains démontages rapides, puis procéder au broyage et au tri. Une coordination des deux flux – gros électroménager (notamment réfrigérateurs) et VHU (hors batteries) – est justifiable du fait de la similitude des produits métalliques utilisés (acier, aluminium, cuivre, etc.) et des importants tonnages de déchets métalliques recyclés (par refusion après démontage et/ou broyage et tri).

Le mélange des flux peut donc être une source d'optimisation industrielle, mais il peut être gênant pour plusieurs raisons :

- tout d'abord, le mélange des flux peut créer des difficultés pour évaluer les taux de recyclage par filière REP. Si une partie des DEEE est traitée en même temps que les emballages, par exemple, elle peut

échapper aux statistiques de la filière DEEE et grever les coûts de la filière emballage :

- d'autre part, il y a des dangers potentiels d'incendie, par exemple dans le cas d'un jouet dont les piles n'ont pas été démontées (ou sont indémontables !);
- de plus, il est sans doute nécessaire de trier en amont (donc au niveau des ménages) si on veut, comme le souhaitent les pouvoirs publics, augmenter le taux de réemploi et de réparation.
- enfin, selon des cas, la valorisation matière de certains sous-flux peut se retrouver dégradée, comme dans le cas des LED assez logiquement intégrés dans le flux des PAM, mais qui se trouvent ainsi moins séparées qu'elles ne l'étaient dans les flux des ampoules fluo-compactes auparavant.

À l'inverse, l'avantage du mélange des flux est évidemment d'avoir de plus gros flux qui justifient des investissements plus importants, notamment dans les techniques de tri automatiques, avec un taux de récupération en matériaux globalement plus important.

Comme indiqué plus haut dans ce rapport, il y a ici nécessité d'études économiques poussées pour faire des choix, en incluant évidemment dans l'analyse les résultats des analyses de cycle de vie (ACV). Le sujet est très complexe, car chacun des intervenants de la chaîne doit trouver une certaine rentabilité pour investir et innover.

Or, la situation économique n'est pas actuellement favorable à tous les intervenants de la chaîne. Elle peut être résumée de la façon suivante :

Les recettes sont, par acteur économique :

- les écocontributions payées par les acheteurs de produits et perçues par les éco-organismes,
- les taxes d'enlèvement des ordures ménagères perçues par les collectivités locales,

- les revenus générés par la revente des matériaux après tri et la revente éventuelle de sous-ensembles qui peuvent être réutilisés.

En l'état actuel des choses (législation et réglementation), il n'y a pas de gain financier pour la diminution éventuelle d'équivalent CO₂ ou pour l'élimination de matières potentiellement dangereuses.

Les dépenses nécessaires sont, par étape :

- les frais de collecte réalisée par des sociétés spécialisées qui sont, en principe, rémunérées par les municipalités ou par des entreprises devant gérer leurs déchets. Certains produits sont collectés par des magasins ou des artisans pour effectuer des réparations et revendre directement d'occasion (ou exporter vers des pays moins exigeants)
- les frais de séparation des matières, le plus souvent par broyage puis tri, réalisés par des entreprises dites de recyclage⁷⁴
- les frais éventuels de traitement pour pouvoir utiliser les matières recyclées dans les ateliers refaisant des produits de qualité. Ces opérations sont souvent faites par les fabricants de matériaux (métaux ou verres, par exemple), mais dans le cas des polymères, il peut y avoir des entreprises indépendantes (ou dépendantes des industriels du recyclage).

Il est à noter que pour récupérer certains métaux rares, il est souvent nécessaire d'effectuer des opérations supplémentaires telles qu'un traitement par pyrométallurgie avec, souvent, une opération d'hydrométallurgie pour trier encore plus finement. On peut citer le cas de l'entreprise Umicore⁷⁵ en Flandres qui s'est spécialisée dans la récupération du nickel ou le cas des cartes électroniques avec du cuivre (20 %), de l'étain (4 %), du nickel (2 %), du plomb (2 %), de l'argent (0,2 %), de l'or (0,1 %) et même du

74 Bien que cette appellation soit contestée par certains, notamment par les entreprises qui reprennent ce qui a été trié.

75 Voir : <https://pmr.umicore.com/en/>

palladium (0,01%). Il y a des gains assez clairs de revente de métaux, mais les coûts de séparation sont aussi très élevés.

Le recyclage des DEEE constitue donc un système complexe où interviennent divers acteurs. Pour les entreprises, il faut que, globalement, les recettes dépassent les dépenses pour favoriser les investissements matériels et immatériels (investissements, frais de recherche et développement, formation, marketing innovation, etc.) et il faut encore que chacun des intervenants y trouve son compte sous peine de bloquer le cycle. Le niveau d'écocontribution doit être ajusté pour que la balance globale soit respectée, mais sans engendrer de rentes de situation anormales. Il faut, enfin, que les négociations entre les différents intervenants aboutissent à des prix de cession permettant à chacun de vivre, d'innover et, surtout, d'investir.

Si on prend l'exemple d'un appel d'offre fait par un éco-organisme pour faire traiter un flux par des entreprises de recyclage, ces dernières doivent envisager des investissements de lignes spécifiques ou d'équipements particuliers. Il leur faut alors des garanties de flux et de prix de cession pour une durée suffisante, et l'État peut intervenir à ce niveau pour faciliter et donner de la prévisibilité.

L'État est un intervenant majeur qui peut favoriser l'éco-conception des produits grâce à la réglementation, et/ou par une modulation de l'écocontribution. Cette éco-conception intègre la fin de vie du produit, dans une analyse de cycle de vie du berceau au berceau : durée de vie, taux de réparation probable, recyclabilité dans les chaînes existantes, etc. et pour chaque étape, à quel coût et pour quel niveau de pollution. L'étude peut éventuellement aboutir à ce que seule l'incinération soit possible. On peut espérer qu'à long terme une telle démarche porte des fruits importants mais on peut aussi s'attendre à ce que le déploiement prenne beaucoup de temps.

À plus long terme, il serait éventuellement envisageable de reprendre certaines Installations de stockage de déchets dangereux (ISDD), qui contiennent une part minoritaire mais significative de DEEE, et de les retraiter pour en extraire les matériaux rares qui y sont demeurés et subsistent encore.

Difficultés et perspectives

On voit que la filière DEEE est particulièrement complexe, avec un grand nombre de flux spécifiques souvent de faible débit en masse, comportant des matières dangereuses et nécessitant des traitements de séparation qui peuvent être longs et difficiles. Certes, les perspectives d'innovation dans chacune des parties du système industriel complexe des DEEE sont réelles, notamment dans le domaine du tri automatique. Toutefois, la filière DEEE concentre l'ensemble des difficultés posées par les questions du recyclage des produits de masse. Une analyse soigneuse du cycle économique est par conséquent indispensable, et l'évaluation pertinente des niveaux d'écocontribution requiert une démarche d'éco-conception intégrant la fin de vie, les interactions possibles entre flux (à examiner en détail⁷⁶) et la prise en compte de la réparation, ainsi que d'autres facteurs économiques et réglementaires.

On retrouve ainsi au niveau de la filière DEEE l'interaction entre flux qui a été évoquée au niveau global pour une approche inter-filière. À ce titre, la filière DEEE pourrait servir de cas d'école pour l'apprentissage du recyclage dans des systèmes complexes en vue d'un traitement ultérieur de l'économie circulaire dans sa globalité et sa complexité.

76 On pourrait, par exemple, imaginer de mélanger les petits appareils DEEE électroménagers non dangereux dans la poubelle des emballages propres, et de fournir une autre poubelle (rouge) pour des produits DEEE dangereux repérables par le particulier grâce à un rond rouge visible sur l'objet. Cette approche de mélange rendrait les tris plus compliqués et pourrait influencer négativement le taux de réparation, mais elle pourrait augmenter en revanche le taux global de recyclage. Est-ce intéressant globalement ? Seul un examen approfondi permettrait de déterminer si une telle approche pourrait générer une amélioration globale du système.

3.1. RECOMMANDATIONS

- **Étudier comment améliorer la récupération des petits équipements électroménagers au niveau des particuliers (classes 5 et 6 par exemple).** On pourrait imaginer que certains puissent être jetés avec les poubelles jaunes pour les emballages. Ceci nécessiterait d'aménager les usines de tri et aurait évidemment un coût à négocier entre la filière emballage et la filière DEEE.
- **Envisager la création d'une poubelle pour d'autres petits équipements** pouvant présenter un danger, collectés avec d'autres déchets provenant d'autres filières (des piles, par exemple), notamment pour les particuliers n'ayant qu'un accès limité à des collectes spécifiques en déchetterie.
- **Encourager un taux de matière recyclée dans le produit final,** grâce à des éco-conceptions dédiées au secteur des EEE et des logiciels et bases de données adaptées, afin de ne pas se contenter de limiter le nombre de matières différentes (souvent difficiles pour les EEE).
- **Inciter et accompagner l'utilisation de capacités de pyrométallurgie et d'hydrométallurgie** pour exploiter les opportunités offertes par le recyclage. Cet accompagnement devra également porter sur la formation ainsi que la recherche et développement.

Chapitre 4

BÂTIMENT ET TRAVAUX PUBLICS (BTP)

Contexte

Les déchets du secteur du Bâtiment et des Travaux Publics (BTP) représentent la plus grosse part des déchets produits en France (70 %), avec 3 600 kg par habitant en 2018⁷⁷. À titre de comparaison, l'équivalent pour les déchets municipaux est de 583 kg par habitant. Parmi les 240 millions de tonnes produites, 81% proviennent plus spécifiquement des travaux publics. Le secteur des BTP génère ainsi les plus grands flux de déchets en volume et en tonnage, mais pas nécessairement en valeur.

Malgré une appellation commune, les différences entre les deux secteurs concernés (bâtiment d'un côté, travaux publics de l'autre) sont importantes⁷⁸. Le secteur du bâtiment (construction, rénovation, démolition) fait intervenir de très nombreuses entreprises, parfois de petite taille, avec de nombreux corps de métiers différents. Les chantiers sont diversifiés, produisant des déchets variés et nécessitant la mise en place de dispositifs adaptés et adaptables. Le secteur des travaux publics (voirie et ouvrage d'art), en revanche, fait intervenir essentiellement de grandes entreprises. Les déchets sont relativement homogènes et les dispositifs logistiques

77 ADEME. Déchets chiffres-clés : l'essentiel 2020. 2021, brochure 010696, 36 p.

78 OPTIGEDE. Centre de ressources économie circulaire et déchets (en ligne). Disponible sur <https://optigede.ademe.fr/dechets-du-batiment-et-des-travaux-publics> (consulté le 18 juin 2021)

que sont capables de mettre en place ces grands acteurs permettent d'améliorer le taux de valorisation. Les différences observées de taux de recyclage entre secteurs s'expliquent par la typologie des déchets dans ce secteur.

Typologie des déchets

Il existe trois grandes catégories de déchets : (i) les déchets inertes, qui ne subissent aucune modification importante (physique, chimique ou biologique) en fin de vie ; (ii) les déchets non-dangereux, qui vont évoluer, mais sans engendrer de risques ; et (iii) les déchets dangereux, qui contiennent des substances nocives pour la santé et l'environnement. La brique, le béton et l'acier rentrent dans la première catégorie, la matière organique (dont le plastique et le bois) et le plâtre dans la seconde, et l'amiante et le plomb dans la troisième.

Globalement, près de la totalité (97 %) des déchets issus des travaux publics sont des déchets inertes, alors qu'ils ne représentent qu'environ 70 % pour le bâtiment⁷⁹. Les enjeux de tri dans ce dernier secteur sont par conséquent importants, car toute contamination limitera la valorisation du matériau⁸⁰. C'est pour cette raison que la déconstruction tend à prendre le pas sur la démolition : les différents éléments sont séparés en amont, limitant les mélanges.

Filières de traitement des déchets

Comme pour tout autre secteur, la hiérarchie des modes de traitement des déchets s'applique. La prévention doit être privilégiée, suivie par le

79 ADEME. Déchets chiffres-clés : l'essentiel 2020. 2021, brochure 010696, 36 p.

80 Note : l'aspect économique à ce titre est de taille, car les installations de stockage de déchets inertes (ISDI) coûtent 20 fois moins cher que les installations de stockage de déchets non dangereux (ISDN).

réemploi, le recyclage (valorisation de matière), et la valorisation énergétique. Si aucune de ces stratégies ne peut s'appliquer, alors seulement le déchet peut être éliminé (c'est-à-dire mis en décharge).

– **La prévention**

La prévention est l'une des facettes du problème les plus difficiles à mettre en œuvre. En effet, les infrastructures à vie longue (de l'ordre du siècle) impliquent des acteurs de la construction différents de ceux de la déconstruction. Outre la prise en compte des impacts environnementaux lors de la phase de construction (par calcul d'analyse de cycle de vie par exemple), il existe bien d'autres moyens pour favoriser l'économie circulaire dans ce secteur. L'architecture de l'assemblage (comme l'installation de réseaux apparents), l'utilisation d'un nombre limité de matières (à faible déformation, avec des finitions brutes) et la modularité sont des points essentiels. Cette dernière doit permettre de faire évoluer les usages d'un bâtiment (de bureau à appartement par exemple ou modification aisée du cloisonnement), pour permettre un allongement de la durée de vie de l'édifice. Les méthodologies de l'éco-conception doivent intégrer les analyses nécessaires pour comparer les différentes solutions entre elles grâce à des bases de données fiables et certifiées.

– **Le réemploi**

En cas de réemploi, le matériau échappe au statut de déchet. Le réemploi peut être fait *in situ* ou *ex situ*. Les éléments concernés sont souvent à forte valeur patrimoniale pour le secteur du bâtiment, mais peuvent être également des matériaux « de base » pour les travaux publics. Ainsi, des granulats de béton sont utilisés en sous-couche routière, ou des enrobés sont directement intégrés dans une nouvelle voirie⁸¹. Cependant, le réemploi direct est souvent limité et les matériaux demandent un traitement de préparation (broyage, criblage) pour être réincorporés. Un déclassement de la matière, avec des applications à valeur ajoutée plus faible, est souvent observé.

81 OREE. Comment mieux déconstruire & valoriser les déchets du BTP ? 2018, 88 p.

– **Le transport**

l'existence d'un réseau de déchetteries professionnelles est nécessaire, notamment pour les déchets du BTP qui, étant très volumineux et pondéreux, ne peuvent pas être transportés sur de longues distances.

– **Le recyclage**

L'ADEME et l'éco-organisme ECOSYSTEM, via la plateforme collaborative Démoclés⁸², recensent les différentes filières de valorisation des déchets du bâtiment. En particulier, les déchets du second œuvre sont classés en 16 catégories (le verre plat, les moquettes textiles etc.). Des fiches techniques permettent de cartographier les acteurs (préparateur, exutoire) concernés. Ces déchets s'intègrent alors dans des filières (dont des filières REP) déjà existantes. Un tri (souvent manuel) de bonne qualité est indispensable pour que les matériaux puissent être valorisés.

Enjeux

Aujourd'hui, seule la moitié des déchets du secteur du BTP sont valorisés alors que l'Europe avait fixé des objectifs à 70 % pour 2020⁸³. Comme indiqué précédemment, la filière est en train de se structurer autour de plusieurs éco-organismes : deux ont été créés récemment (ECOMINERO et VALOBAT) et deux autres existants sur des périmètres différents (VALDELIA et ECOMAISON (anciennement ECO-MOBILIER)) souhaitent être associés. Selon l'étape du cycle de vie des ouvrages du BTP, les enjeux pour favoriser l'économie circulaire sont différents :

- Lors des phases de conception et de construction, le besoin de traçabilité de l'architecture et des matériaux utilisés est important. Une compréhension dès la conception d'un projet de la manière

82 Démoclés. Les clés de la démolition durable (en ligne). Disponible sur : <https://www.democles.org/> (consulté le 18 juin 2021).

83 Ministère de la transition écologique. Déchet du bâtiment et des travaux publics (en ligne). 2019, disponible sur : <https://www.ecologie.gouv.fr/dechets-du-batiment-et-des-travaux-publics> (consulté le 18 juin 2021).

dont l'infrastructure pourrait servir de réservoir de matière première secondaire en fin de vie permet d'améliorer la qualité et l'efficacité du recyclage, et un diagnostic dans ce sens est maintenant obligatoire depuis la loi AGECE de 2020⁸⁴. Pour les nouveaux édifices, l'intégration de ces informations peut être envisagée très en amont du projet (en complément du Building Information Modelling (BIM)), mais des questions sur la transmission des données au déconstructeur futur se posent, car les acteurs impliqués sont différents et interviennent à des périodes parfois très éloignées dans le temps, avec des intervalles d'intervention allant de plusieurs années à plusieurs décennies, voire des siècles.

- Lors d'un projet de démantèlement, les matériaux (types et quantités) identifiés dans le diagnostic doivent trouver un repreneur pour être valorisés. L'adéquation entre quantité, qualité et période de disponibilité est difficile à trouver, surtout que l'offre et la demande doivent entrer en résonance à l'échelle locale (pour limiter les impacts liés au transport).
- Pour les matériaux de gros œuvre (aussi bien dans le bâtiment que dans les travaux publics), l'amélioration de leur valorisation exige une bonne caractérisation préalable (en particulier de leurs propriétés mécaniques). Une connaissance précise de chaque gisement doit permettre de valoriser les matériaux dans des applications plus exigeantes, et éviter ainsi un déclassement trop important. D'autre part, le développement de nouvelles étapes de préparation doit améliorer les rendements de traitement et ouvrir de nouveaux marchés (comme l'incorporation de plus en plus importante de granulats de béton dans de nouveaux bétons).
- L'acceptabilité par l'acheteur du réemploi de matériaux de construction constitue un objectif majeur, nécessitant un dialogue approfondi, notamment entre constructeurs et assureurs et dans

84 Ministère de la transition écologique. Loi n° 2020-105 du 10 février 2020 relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire. 2020, JORF n° 0035.

la définition des normes de construction et de sécurité. À ce titre, il convient de bien distinguer entre réemploi et matériel d'occasion.

- Lors de la phase opérationnelle de déconstruction de bâtiment, une séparation rapide, automatisée et efficace est la clé pour augmenter la part de valorisation. Les protocoles mis en place doivent être généralisés pour être appliqués par l'ensemble des acteurs. La séparation doit pouvoir se faire sur de petits chantiers (outils mobiles et robustes) ou au sein de centres de tri maillant le territoire.
- Plus généralement, la durée de vie des infrastructures doit être prolongée, tout en respectant les nouvelles normes environnementales et de sécurité.

4.1. RECOMMANDATIONS

- **Mettre en place des outils de stockage de données sur les plans et matériaux des bâtiments nouvellement construits.** Ceci pourrait se faire via une obligation des maîtres d'ouvrage et d'œuvre de stocker l'information en interne, ou via un service public financé par la nouvelle REP BTP.
- **Développer des bourses territoriales de matériaux disponibles,** en particulier pour des éléments patrimoniaux, en généralisant des initiatives déjà existantes dans certaines grandes entreprises ou dans des associations.
- **Inciter les constructeurs à éco-concevoir l'édifice en prenant en compte son démantèlement** et les inciter à utiliser des matériaux recyclés. Comme le constructeur n'est généralement pas le déconstructeur, une modulation de l'écocontribution (comme cela se pratique pour d'autres filières REP) pourrait être envisagée.
- **Encourager la recherche et le développement** sur (i) des outils de **caractérisation rapide** (portatifs par exemple) des matériaux secondaires produits, (ii) des **opérations de séparation** adaptées au tri des déchets de chantier de démolition du BTP, (iii) des **techniques de préparation** des matériaux en vue d'applications à plus haute valeur ajoutée.
- **Développer la formation des opérateurs** en matière de démontage et de recyclage. Plus encore que dans les autres secteurs, la formation dans l'ensemble des métiers du BTP est une nécessité absolue.
- **Développer l'éco-conception et l'utilisation des ACV adaptées à la filière BTP,** notamment les méthodologies et bases de données spécifiques à ce secteur.

CONCLUSIONS

Les politiques publiques ne doivent pas se contenter seulement de fixer des objectifs ambitieux en matière de recyclage, mais elles doivent surtout s'assurer que les objectifs fixés sont atteignables et seront effectivement atteints. À ce propos, l'Académie des technologies insiste dans le présent rapport sur l'importance de systèmes industriels efficaces et coordonnés pour un recyclage à grande échelle à un coût économique acceptable pour les contribuables et plus généralement pour la société entière.

L'approche réglementaire par filières REP (Responsabilité élargie du producteur) est un élément clé permettant de responsabiliser les producteurs et d'apporter une vision et une trajectoire des objectifs pour l'ensemble des acteurs concernés ainsi que des financements. Mais la réalisation d'actions concrètes requiert une démarche plus globale, portant sur la prise en compte des interactions entre filières et matériaux, les croisements entre les innovations et les développements technologiques, l'articulation de tous les acteurs économiques dans les chaînes de la collecte, du tri et de la transformation, ainsi que des méthodologies d'éco-conception, de modèles d'affaires et de politiques publiques basées sur des données indépendantes et certifiables.

Le domaine du recyclage constitue ainsi un exemple emblématique d'une démarche de planification écologique régulée par l'État mais faisant appel à des acteurs économiques publics et privés, chacun ayant un rôle à jouer et une rentabilité à assurer.

Au-delà des questions d'efficacité et de rentabilité, l'Académie souhaite mettre également en exergue l'importance d'une cohérence d'ensemble, comprenant la formation à tous les niveaux, la reconnaissance des métiers, la sensibilisation de tous, la gouvernance de l'intervention de l'État, le développement d'une recherche économique nouvelle et l'intégration d'innovations à la fois technologiques et organisationnelles.

L'Académie des technologies recommande ainsi les cinq orientations prioritaires suivantes :

- 1) **Transversalité** : promouvoir une vision transversale technique, économique et sociale entre les différentes filières, les industries de tri et de recyclage et les fabricants de matériaux, en visant, dans la mesure du possible, une harmonisation des pratiques
- 2) **Analyses et données indépendantes** : créer un écosystème d'analyse et de recueil de données rigoureux, capable d'assurer un climat de confiance et de stabilité, avec une vision collective de sa validité
- 3) **Affichage** : associer une valeur environnementale publiable à un produit en fonction de sa conception, à partir de données et d'analyses normalisées et certifiées d'éco-conception
- 4) **Droit du travail** : reconnaître juridiquement les métiers de démantèlement et de démontage, dans les conventions collectives, comme des métiers à part entière
- 5) **Formation** : repenser la formation des ingénieurs, techniciens et enseignants afin d'y intégrer des compétences en démontage et en éco-conception

Annexe 1

Date de mise en œuvre opérationnelle des différentes filières REP
(source : ADEME⁸⁵)

Filières européennes :

- 1993 : Emballages ;
- 2001 : Piles et accumulateurs portables ;
- 2006 : Automobiles, Equipements électriques et électroniques ;
- 2009 : Médicaments, Gaz fluorés, Piles et accumulateurs automobiles et industriels.

Filières volontaires :

- 2001 : Produits de l'agrofourriture ;
- 2010 : Mobilhomes ;
- 2011 : Cartouches d'impression.

Filières françaises :

- 2004 : Pneumatiques ;
- 2006 : Papiers graphiques ;
- 2007 : Textiles habillement, Linge de maison et chaussures
- 2012 : Ameublement, Produits chimiques, Déchets d'activités de soins à risques infectieux ;
- 2015 : Bouteilles de gaz ;

85 <https://www.ademe.fr/expertises/dechets/elements-contexte/filieres-a-responsabilite-elargie-producteurs-rep>

- 2019: Bateaux de plaisance ou de sport ;
- 2021: Mégots ;
- 2022: Huiles, Bâtiments, Articles de bricolage et de jardin,
Articles de sport et loisirs, Jouets.

Nouvelles filières en cours de structuration ou à venir :

- 2023: Emballages issus de la restauration ;
- 2023: Produits et matériaux de construction du secteur du bâtiment
- 2024: Textiles sanitaires à usage unique ;
- 2025: Engins de pêche.

Annexe 2

Aperçu de quelques initiatives innovantes en recyclage et éco-conception (source : FEDEREC)

- Guide Écoconception et recyclage des meubles – Valdelia mars 2016
- Guide sur le recyclage des composites – CRECOF mars 2017
- Guide ECO 3E d'écoconception des équipements électriques et électroniques – ESR et Ecologic – 2017
- Guide recyclabilité des emballages : COTREP 2016, Guide du CNE 2018
- Travaux Éco-conception des produits mécaniques CEN TS 16524 – UNM – 2018
- Travaux du CSTB sur l'éco-conception des bâtiments et la réincorporation des MPR
- Analyse en ligne de Plastic Recyclers Europe : RecyClass en 2018
- Multiples travaux des différents CTI (IRTM2P, CETIM, IPC, CTCPA)

Annexe 3

Dispositions de la loi AGECE relatives à la consigne de bouteilles en plastique pour boissons

Avant le 30 septembre 2020, l'ADEME rend public un rapport sur les taux de performance de la collecte et du recyclage des bouteilles en plastique pour boisson atteints en 2019.

Ce rapport évalue par ailleurs :

- la trajectoire annuelle de collecte pour recyclage permettant d'atteindre les objectifs de collecte des bouteilles en plastique 2025 et 2029
- la capacité de respecter cette trajectoire par l'extension des consignes de tri à l'ensemble des emballages plastiques et les actions prévues dans le cadre de la filière responsabilité élargie du producteur pour le hors foyer, notamment les soutiens aux collectivités pour l'amélioration de la collecte dans l'espace public et le développement de celle à la charge des entreprises
- les impacts technico-économiques, budgétaires et environnementaux d'un dispositif de consigne pour réemploi et recyclage comparés aux impacts d'autres modalités de collecte

À partir de 2021, l'ADEME publie chaque année, avant le 1^{er} juin, une évaluation des performances en distinguant les bouteilles collectées par le service public de gestion des déchets ménagers, par les corbeilles de tri dans l'espace public et par la collecte au sein des entreprises.

En 2023, « si les performances cibles ne sont pas atteintes, le Gouvernement définira... les modalités de mise en oeuvre d'un ou plusieurs dispositifs de consigne pour recyclage et réemploi »

Concrètement le gouvernement pourra imposer aux producteurs ou à leur éco-organisme « de mettre en oeuvre d'autres dispositifs de consigne

lorsque ces dispositifs sont nécessaires à l'atteinte des objectifs nationaux ou européens...»⁸⁶.

86 Dans ce cas, les collectivités territoriales n'auront pas le choix, et la ressource financière qu'apportent les bouteilles en plastique sera perdue.

Annexe 4

Liste des sigles et acronymes

ACTIA	Association de coordination technique pour l'industrie agro-alimentaire
ACV	Analyse de cycle de vie
ADEME	Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
AGEC	Loi « anti-gaspillage et économie circulaire » (2020)
ADELPHE	Éco-organisme pour la collecte et le recyclage d'emballages ménagers, filiale de CITEO
ALIAPUR	Éco-organisme spécialisé dans la collecte et le recyclage de pneus
APER	Éco-organisme pour le recyclage des bateaux de plaisance et de sport
BIM	Building information modelling (modélisation de données du bâtiment)
BTP	Bâtiment et travaux publics
CiFREP	Commission inter-filières REP
CITEO	Éco-organisme des secteurs emballages ménagers et papiers graphiques
CMC	Composites à matrice céramique
CME	Confédération des métiers de l'environnement
CMM	Composites à matrice métallique
CMO	Composites à matrice organique
COREPILE	Éco-organisme pour la collecte et le recyclage de piles et accumulateurs portables
CRECOF	Comité recyclage composites France
CSF	Comité stratégique de filière

CSR	Combustible solide de récupération
CTO	Comité technique opérationnel
DEEE	Déchets d'équipements électriques et électroniques
ECOLOGIC	Éco-organisme pour la collecte et le recyclage des DEEE
ECOMAIISON	Éco-organisme pour la collecte et le recyclage d'ameublement et de literie
ECOMINERO	Éco-organisme pour la collecte et le recyclage des déchets inertes de construction
ECOSYSTEM	Éco-organisme pour la collecte et le recyclage des DEEE
EEE	Equipements électriques et électroniques
FEDEREC	Fédération professionnelle des entreprises du recyclage
FEEL	Facilitateur d'éco-conception en ligne
FNADE	Fédération nationale des activités de la dépollution et de l'environnement
FRP	France recyclage pneumatiques
GEF	Gros électroménager froid
GES	Gaz à effet de serre
GFRP	Glass-fiber reinforced polymer (plastique renforcé de fibres de verre)
INSEE	Institut national de la statistique et des études économiques
ISDD	Installation de stockage de déchets dangereux
ISDI	Installation de stockage de déchets inertes
ISDN	Installation de stockage de déchets non dangereux
LED	Light-emitting diode (diode électroluminescente)
LEKO	Éco-organisme pour la collecte et le recyclage d'emballages ménagers
LIBS	Laser Induced Breakdown Spectroscopy (spectroscopie d'émission optique de plasma créé par laser)

MODECOM	Méthode de caractérisation des déchets ménagers et assimilés
OCDE	Organisation de coopération et de développement économiques
ODD	Objectifs du développement durable des Nations Unies
OPTIGEDE	Centre de ressources économie circulaire et déchets d'ADEME
OREE	Organisation pour le respect de l'environnement dans l'entreprise
PAM	Petits équipements autres qu'informatiques et électroménagers
PE	Polyéthylène
PEM	Petit électroménager
PEM IT	Petits équipements informatiques et télécommunication
PET	Polyéthylène téréphtalate ou polytéréphtalate d'éthylène
PIA	Programme des investissements d'avenir
PLLA	Acide L-poly lactique
PME	Petites et moyennes entreprises
PNPD	Programme national de prévention des déchets
PP	Polypropylène
PS	Polystyrène
PV	Panneaux photovoltaïques
PVC	Polychlorure de vinyle
REOMi	Redevance d'enlèvement des ordures ménagères incitative
REP	Responsabilité élargie des producteurs
rPET	Polyéthylène téréphtalate recyclé
RX	Rayons X
SALTO	Sequential adaptive loop technology (tri séquentiel auto-adaptatif)

SCRELEC	Éco-organisme pour la collecte et le recyclage de piles, d'accumulateurs portables et du gros et petit électroménager
SNEFiD	Syndicat national des entrepreneurs de la filière déchet
SOREN	Éco-organisme pour la collecte et le recyclage de panneaux photovoltaïques
TECV	Loi « transition énergétique pour la croissance verte » (2015)
TEOMi	Taxe d'enlèvement des ordures ménagères incitative
TGAP	Taxe générale sur les activités polluantes
TPE	Très petites entreprises
TVD	Transformation et valorisation des déchets
VALDELIA	Éco-organisme pour la collecte et le recyclage des produits et matériaux du bâtiment
VALOBAT	Éco-organisme pour la collecte et le recyclage des déchets du bâtiment
VHU	Véhicules hors d'usage

Annexe 5

Liste des personnalités et experts auditionnés

- Virginie ALLAIN, Pilote transverse économie circulaire, Bouygues Construction
- Antoine BOURELY, Directeur général délégué, Pellenc ST
- Manuel BURNAND, Directeur général, FEDEREC
- Laure CLERGET, Directrice d'usine, ARTEMISE, présidente du Club d'écologie industrielle de l'Aube
- Vincent COLLARD, Responsable R&D éco-conception, CITEO
- Stéphane FEDOU, Directeur Plastic Circular Economy, Axens
- Didier MAJOU, Directeur général, ACTIA
- Alain MARTY, Directeur scientifique, Carbios
- Nora MEGDER, Déléguée générale, Confédération des métiers de l'environnement, déléguée permanente, Comité stratégique de filière TVD
- Tess POZZI, Chargée de relations institutionnelles, Derichebourg Environnement

Annexe 6

Liste des membres du groupe de travail

Membres de l'Académie des technologies :

- Bernadette BENSAUDE-VINCENT
- Alain BERNARD
- Pierre CASTILLON
- Jean-Pierre CHEVALIER
- Christian COLLETTE †
- Bruno DUBOST
- Bernard ESTEVE
- Gérard GRUNBLATT
- François KEPES
- Patrick MAESTRO
- Michael MATLOSZ
- Jean-François MINSTER
- François MUDRY
- Hélène OLIVIER-BOURBIGOU
- Michèle PAPPALARDO
- Paul PARNIERE
- Patrice SIMON
- Gilles TRYSTRAM

Membres du secrétariat scientifique :

- Clotilde CHAGNY
- Baptiste LAUBIE
- Yann LE BRECH
- Marie LE PAGE MOSTEFA

Notes de fin

Le présent Rapport de l'Académie des technologies sur le recyclage est centré sur la gestion et le traitement industriel de circuits de matière, de matériaux et d'objets matériels dans une approche multifactorielle. Il analyse la collecte, le tri et la transformation des différents gisements de déchets, avec une focale sur les plastiques, composites et équipements électriques et électroniques des ménages, ainsi que sur les matériaux du bâtiment et des travaux publics (BTP).

Dans ce rapport l'Académie ne fait pas une analyse des technologies existantes ou en développement mais se focalise plutôt sur l'importance de systèmes industriels performants, intégrés dans les circuits de collecte, de tri et de transformation de la matière, car ce sont ces systèmes industriels qui détermineront la viabilité économique du recyclage à grande échelle, facteur clé de réussite de la transition écologique.

L'Académie formule cinq orientations prioritaires portant sur l'approche industrielle, l'analyse économique, l'éco-conception, le droit social et la formation.

Académie des technologies
Le Ponant – Bâtiment A
19, rue Leblanc
75015 PARIS
+33(0)153854444
secretariat@academie-technologies.fr
www.academie-technologies.fr

ISBN : 979-10-97579-49-4



Couverture : Anoo@Adobe Stock