

SYNTHESE / EXTENDED ABSTRACT
FRANÇAIS / ENGLISH

**RECYCLAGE CHIMIQUE ET PHYSICO-CHIMIQUE
DES DECHETS PLASTIQUES**

***CHEMICAL AND PHYSICO-CHEMICAL
RECYCLING OF PLASTIC WASTE***

juin 2022

E. HARSCOET, S. CHOUVENC, A.-C. FAUGERAS, F. AMMENTI – DELOITTE

Deloitte.

Créée à l'initiative du Ministère en charge de l'Environnement, l'association RECORD est depuis 1989, le catalyseur d'une coopération entre industriels, institutionnels et chercheurs.

Acteur reconnu de la recherche appliquée dans le domaine des déchets, des sols pollués et de l'utilisation efficace des ressources, RECORD a comme objectif principal le financement et la réalisation d'études et de recherches dans une perspective d'économie circulaire.

Les membres de ce réseau (groupes industriels et institutionnels) définissent collégialement des programmes d'études et de recherche adaptés à leurs besoins. Ces programmes sont ensuite confiés à des laboratoires publics ou privés.

Avertissement :

Les rapports ont été établis au vu des données scientifiques et techniques et d'un cadre réglementaire et normatif en vigueur à la date de l'édition des documents.

Ces documents comprennent des propositions ou des recommandations qui n'engagent que leurs auteurs. Sauf mention contraire, ils n'ont pas vocation à représenter l'avis des membres de RECORD.

- ✓ Pour toute reprise d'informations contenues dans ce document, l'utilisateur aura l'obligation de citer le rapport sous la référence :
RECORD, Chemical and physico-chemical recycling of plastic waste, 2022, 177 p, n°21-0919/1A
- ✓ Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de la transition écologique)
www.ademe.fr

© RECORD, 2022

RESUME

Le projet a pour but d'appréhender les différentes technologies existantes de recyclage chimique et physico-chimique des déchets plastiques. Ces technologies prometteuses pourraient permettre de traiter des déchets difficilement recyclables et produire des plastiques aptes au contact alimentaire. Cependant, peu d'informations sont disponibles à l'heure actuelle pour comparer ces procédés ainsi que pour en évaluer les performances en termes économiques ou environnementaux. Les incertitudes liées à ces nouvelles technologies sont également fortes étant donné leur stade de développement actuel (souvent à l'échelle d'une unité pilote ou démonstration). Ainsi cette étude a vocation à dresser un état des lieux des différentes technologies de recyclage chimique et physico-chimique via une revue de littérature et à éclaircir les questions en suspens à l'aide, notamment, de consultations d'experts.

MOTS CLES

Recyclage chimique, Recyclage physico-chimique, Pyrolyse, Gazéification, Dissolution, Solvolysse, Hydrocraquage, Vapocraquage, Déchets plastiques, Avis d'experts.

SUMMARY

The project aims at understanding the different existing technologies for the chemical and physico-chemical recycling of plastic waste. These promising technologies could allow to process hard-to-recycle plastic waste and produce high-quality recycled plastics. However, little information is currently available to compare these processes with each other and to assess their performance in economic or environmental terms. The uncertainties associated with these new technologies are also high given their early stage of development (often at pilot/demonstration stage). The purpose of this study is therefore to draw up a state of play of the various chemical and physico-chemical recycling technologies via a literature review and to clarify the pending points, notably by means of expert consultations.

KEY WORDS

Chemical recycling, Physico-chemical recycling, Pyrolysis, Gasification, Dissolution, Solvolysis, Hydrocracking, Vapocaking, Plastic waste, Expert's consultation.

Introduction

Au cours des dernières décennies, les marchés mondiaux ont connu une forte hausse de l'utilisation des matières plastiques. En 1950, la production de matières plastiques s'élevait à environ 1,5 million de tonnes par an (Mt/an)¹. Depuis, ces matériaux sont utilisés pour de nombreuses applications et dans divers secteurs en raison de leur commodité et de leurs propriétés uniques (légèreté, malléabilité, résistance, durabilité, etc.). En 2020, la production de plastiques a atteint 367 Mt/an, dont la plupart sont du PP, PE, PET et PS utilisés dans les secteurs de l'emballage, du bâtiment et de la construction, et de l'automobile. Les projections montrent que d'ici 2025, la production de plastiques s'élèvera à environ 445 Mt/an.

Malgré les multiples avantages associés à l'utilisation des plastiques, les acteurs du secteur prennent de plus en plus conscience des problèmes liés à l'utilisation de ces matériaux, dont leur fin de vie. Ces dernières années, de nombreux médias et ONG ont dénoncé la pollution causée par cette industrie ainsi que son impact sur l'environnement (en particulier sur l'océan), ce qui a conduit à une perception négative des plastiques par les consommateurs. En effet, il existe aujourd'hui des preuves évidentes qu'une mauvaise gestion du cycle de vie des plastiques et des flux de déchets associés a un impact négatif sur l'environnement, la société et l'économie.

En améliorant la circularité des plastiques, les technologies de recyclage peuvent résoudre une partie des problèmes liés à ce secteur. Actuellement, la grande majorité des activités de recyclage s'appuient sur des solutions de recyclage mécanique. Mais actuellement, les taux de recyclage restent faibles (34,6 % des plastiques collectés en Europe en 2020 et 9 % des déchets plastiques générés dans le monde²) en raison de nombreux freins. Des défis existent sur toute la chaîne de valeur, de la collecte des déchets (comportement de tri des consommateurs, marché illégal, etc...) aux contraintes techniques lors des étapes de tri et recyclage par exemple.

Les faibles taux de recyclage mécanique et la qualité limitée des produits recyclés ont encouragé le développement de technologies de recyclage innovantes. C'est dans ce contexte que les solutions chimiques et physico-chimiques ont gagné en popularité, car elles pourraient permettre de traiter les déchets plastiques difficiles à recycler et de produire des plastiques recyclés de haute qualité. Bien que ces technologies fassent l'objet de recherches et de tests depuis longtemps, l'état du marché n'a jamais été suffisamment favorable pour qu'elles soient déployées à une échelle industrielle. La crise actuelle des plastiques fournit les objectifs, les moyens et la stabilité financière nécessaires pour permettre le développement de ces nouvelles solutions de recyclage.

Mais malgré la croissance récente qu'a connue le secteur du recyclage chimique et physico-chimique au cours de ces deux dernières années, il existe toujours un questionnement sur les performances réelles de ces technologies, leur niveau de maturité, leur impact environnemental, leur viabilité économique et les contraintes réglementaires afférentes.

L'objectif de cette étude est de fournir une description objective des solutions de recyclage chimique et physico-chimique existantes (pour des applications plastique à plastique) sur la base des informations disponibles à la date de cette synthèse.

Introduction

Over the past decades, worldwide markets experienced a steep increase in the use of plastic materials. In 1950, plastics' production amounted to about 1.5 million metric tons a year (Mt/y). Since then, these materials started being widely used in numerous applications and sectors on account of their convenience and unique properties (lightness, malleability, resistance, durability, etc.). In 2020, plastics' production reached 367 Mt/y¹, most of which PP, PE, PET, and PS used within the packaging, building & construction, and automotive sectors. Projections show that by 2025, plastics' production will amount to approximately 445Mt/y.

Despite the multiple benefits associated with the use of plastics, stakeholders in the industry have increasingly become aware of the issues associated with the use of these materials, including their end-of-life. Over the past years, medias and NGOs have been reporting on plastic's pollution and its impacts on the environment (especially on the ocean), leading to a negative consumers' perception. There is now staggering evidence of how the mismanagement of plastics' lifecycles and associated waste streams negatively impacts the environment, society, and the economy.

By improving the circularity of plastics, recycling technologies can address part of the problems associated with this sector. Currently, the great majority of recycling activities are carried out through mechanical recycling solutions. Yet, for the time being, recycling rates remain low (34.6% of collected plastics in Europe in 2020 and 9% of the plastic waste generated worldwide²) due to the existence of numerous barriers. Some challenges exist all along the value chain, from the collection of waste (e.g. consumer's sorting behavior, illegal markets, etc.), to sorting and recycling technical challenges as an example.

Low mechanical recycling rates and limited recycled quality have been driving interest in the development of innovative recycling technologies. It is in this context that chemical and physico-chemical solutions have been gaining increasing popularity as they could allow to process hard-to-recycle plastic waste and produce high quality recycled plastics. While these technologies have been researched and tested for a longtime, the market situation was never favorable enough for them to be widely deployed at an industrial scale. Today's plastics crisis is providing the objectives, means, and financial stability to leverage the development of these recycling solutions.

Yet, despite the growth that has been experienced by the chemical and physico-chemical recycling sector over the past couple of years, there is still an ongoing questioning on the actual recycling capabilities of these technologies, their maturity level, environmental impact, economic viability, and regulatory constraints.

The purpose of the study is to provide an objective depiction of existing chemical and physico-chemical recycling solutions (plastic-to-plastic applications) based on available information as of the date of this executive summary.

¹ <https://www.statista.com/statistics/282732/global-production-of-plastics-since-1950/>

² <https://www.oecd-ilibrary.org/sites/de747aef-en/index.html?itemId=/content/publication/de747aef-en>

Le rapport présente des informations détaillées sur les opportunités et les limites de ces technologies, leurs performances économiques et environnementales, leurs perspectives de développement ainsi que le contexte réglementaire actuel (aux USA, dans l'UE et au Japon). Ce travail s'appuie sur la précédente publication de RECORD sur le sujet "Recyclage chimique des déchets plastiques : contexte et perspectives. État de l'art et avis d'experts" (2015)³.

Le recyclage des plastiques est un secteur qui évolue rapidement, ce qui implique d'affiner les informations présentées en fonction des progrès actuels et futurs en matière de technologies de recyclage. Dans ce contexte, ce document doit être considéré comme indicatif.

Ni l'Association RECORD ni les auteurs n'ont la responsabilité de recommander quelle est la meilleure solution à adopter ou de contribuer à la prise de décision concernant la définition d'une stratégie spécifique. Les acteurs du secteur/de l'industrie doivent se réunir et prendre leur propre décision.

Technologies étudiées

L'étude porte sur le recyclage chimique et physico-chimique qui fait référence à plusieurs procédés. Les technologies étudiées sont les suivantes :

- **La dissolution** : Ces procédés utilisent des solvants spécifiques pour purifier les polymères. Ces derniers restent au stade de polymères.
- **Traitement chimique (solvolyse)** : Ces technologies utilisent un solvant (par exemple, de l'alcool) pour dépolymériser les polymères et ainsi revenir à des molécules plus petites (monomères, dimères ou oligomères).
- **Traitement thermique** : Ces procédés à haute température permettent de revenir au stade des monomères ou même des composants initiaux, selon la composition des déchets et la technologie considérée.

Du fait de la variété des procédés existants, il a été convenu d'établir (ci-dessous) une classification des technologies étudiées. Une sélection des principales technologies en cours de développement a été considérée dans le cadre de l'étude.

La classification des technologies de recyclage chimique et physico-chimique en plusieurs catégories suscite systématiquement des débats. Il n'existe actuellement aucun consensus sur les terminologies utilisées. En effet, les procédés de dissolution pourraient ne pas être considérés comme des technologies "chimiques" dans le sens où ils ne modifient généralement pas la structure du polymère. Cependant, on peut soutenir qu'en fonction du solvant utilisé, il peut y avoir une réaction avec le polymère, d'où l'idée de considérer cette technologie comme un recyclage physico-chimique.

The report presents detailed information on the opportunities and limits of these technologies, their economic and environmental performances, their perspectives of development as well as the current regulatory context (in the US, EU, and Japan). This work was built upon RECORD's previous publication on the subject "Chemical recycling of plastic waste: context and perspectives. State of the art and expert's opinion" (2015)³.

The plastic recycling sector is a fast-moving field, which entails refining the messages presented based on current and future work progress around recycling technologies. In this context, this document should be considered as indicative.

Neither the RECORD Association nor the authors have the responsibility for recommending which solution is the best to adopt or contributing to decision-making with regard to the definition of a specific strategy. The sector/industry players shall meet and make their own decision.

Technologies studied

The study focuses on chemical and physico-chemical recycling which refers to several processes. The studied technologies are the following:

- ***Dissolution***: *These processes use specific solvents to purify polymers. The latter remain at the polymer stage.*
- ***Chemical treatment (solvolysis)***: *These technologies use a solvent (e.g., alcohol) to depolymerize polymers and thus go back to smaller molecules (monomers, dimers, or oligomers).*
- ***Thermal treatment***: *These high temperature processes allow to come back to the monomers stage or even to initial components, depending on the feedstock composition and the considered technology.*

Due to the variety of existing processes, it has been decided to present a classification of the studied chemical and physico-chemical recycling technologies of plastic waste below. A selection of the main technologies under development has been studied in the context of the study.

Classification of chemical and physico-chemical recycling technologies in different overarching categories systematically generates debates. There is currently no consensus on the terminologies used. Indeed, dissolution processes might not be considered as "chemical" technologies in the sense that they do not usually alter the polymer structure. However, it is arguable that depending on the solvent chosen, there can be a reaction with the polymer. This technology could thus be considered as physico-chemical recycling.

³ Original title : Recyclage chimique des déchets plastiques : situation et perspectives. Etat de l'art et avis d'experts.

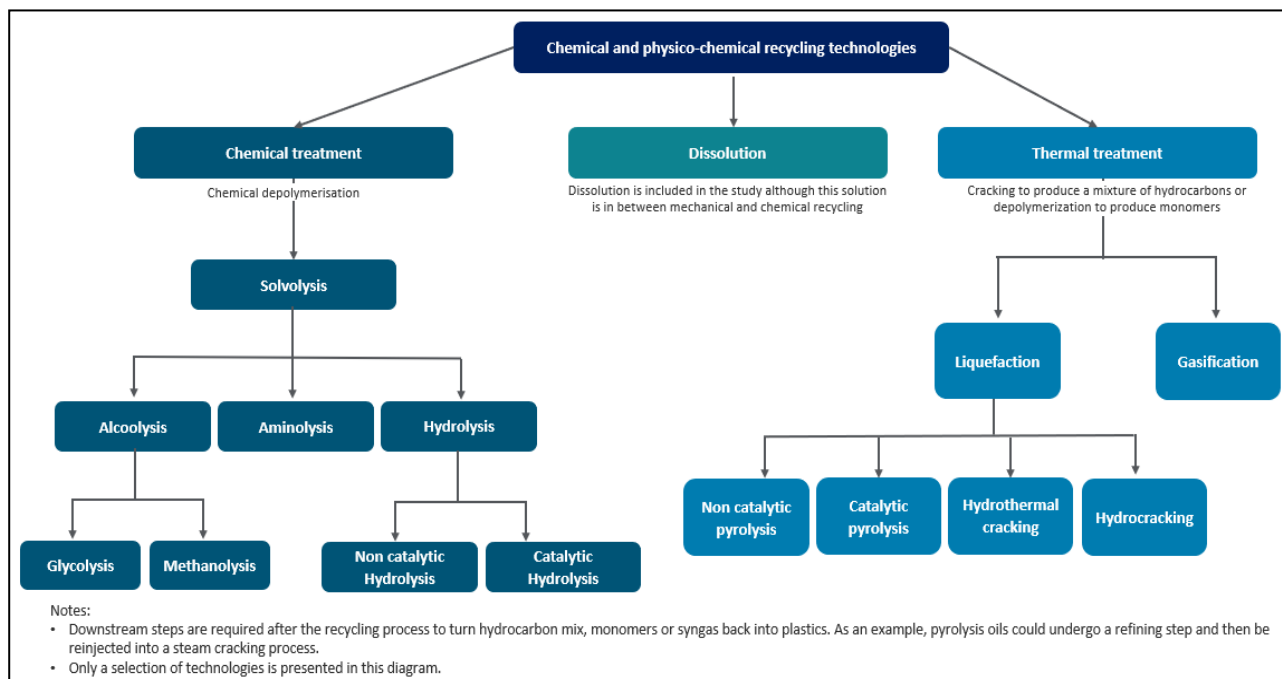


Figure 1 : Technologies de recyclage étudiées (RECORD, 2022)
Figure 1: Studied recycling technologies (RECORD, 2022)

Principaux enseignements

A partir des résultats de la revue de littérature et des consultations d'experts, quelques messages clés sur la pertinence des technologies de recyclage chimique et physico-chimique et sur leurs perspectives de développement pour aider à atteindre la circularité des plastiques sont présentés ci-dessous.

La Technologie

Volume et qualité des intrants

La plupart des experts s'accordent sur le fait que la condition préalable à la réussite d'une technologie de recyclage est l'accès à des déchets en volume et qualité suffisants. La facilité d'accès au gisement de déchets dépendra fortement de la résine et des spécifications requises.

Pour cibler une application spécifique, l'adéquation entre un procédé spécifique et une famille de polymères spécifique est plus susceptible de donner des résultats concluants. Il est donc essentiel de connaître la composition exacte des intrants pour évaluer le type de technologie à utiliser, car aucune technologie ne peut traiter tous les types d'intrants.

Préparation des intrants

De nombreuses start-ups affirment que leurs procédés ne nécessitent pas de pré-traitement des intrants (ou seulement un pré-traitement limité). Cependant, les experts se sont accordés sur le fait que les intrants doivent être pré-traités et que les impuretés doivent être éliminées, pour des raisons économiques et de qualité du produit recyclé. L'alternative serait de passer par une série d'étapes de purification après la réaction chimique, ce qui serait probablement plus coûteux et pourrait avoir un impact plus important d'un point de vue environnemental (ACV) et économique.

Le choix des étapes de préparation appropriées dépend fortement de la composition initiale des déchets et de la technologie de recyclage utilisée par la suite. Les étapes de pré-traitement généralement nécessaires consistent en un pré-tri (pour isoler le polymère ciblé), l'élimination des contaminants contre-indiqués, le broyage et le lavage.

Key learnings

Based on the outcomes from the literature review and the experts' consultation, a few key messages on the relevance of chemical and physico-chemical recycling technologies and their perspectives of development to help reaching plastics circularity are presented below.

Technology

Volume and quality of feedstocks

Most experts agree that the prerequisite condition for a successful recycling process is the access to a feedstock with sufficient volumes and quality. The ease of accessing the feedstock will highly depend on the resin and on requirements.

To target a specific application, a suitable match between a specific process and a specific polymer family is more likely to give adequate results. Knowing the exact composition of the feedstock is thus essential to evaluate what type of technology could be used, as no technology can treat all types of input.

Feedstock preparation

Numerous start-ups claim that their process does not require feedstock preparation (or limited pre-treatment). However, the experts agreed on the fact that feedstock has to be prepared and impurities have to be removed, for economic and quality reasons. The alternative would be to undergo a series of purification steps after the chemical reaction, which is likely to be more costly and may have a higher impact from an LCA and economic perspective.

The selection of the appropriate preparation steps highly depends on the initial composition of the waste and the recycling technology to be used afterwards. The pre-treatment steps usually needed consist in pre-sorting (isolate the polymer of interest), removal of contraindicated contaminants, crushing and washing.

Procédés de recyclage chimique et physico-chimique

Les procédés sont présentés par catégorie dans l'étude. Cependant, il faut garder à l'esprit que chaque développeur de technologie développe une technologie qui possède ses propres spécificités (par exemple un procédé spécifique, des conditions opératoires spécifiques, un catalyseur spécifique, etc.).

La plupart des technologies de recyclage chimique et physico-chimique sont encore en cours de développement. Les procédés de solvolysse sont au stade de développement, certains développeurs de méthanolyse très spécifiques se situant à un niveau de maturité technologique plus élevé (avec un TRL⁴ autour de 8 dans le meilleur des cas). En ce qui concerne les technologies de dissolution, ces procédés sont en phase de développement, avec un TRL moyen de 5. Enfin, le niveau de maturité des technologies de traitement thermique est plus élevé par rapport aux autres procédés de recyclage chimique, puisque la majorité des technologies étudiées ont un TRL allant de 5 à 8, certaines ayant même atteint des capacités industrielles.

Veillez noter que les TRL présentés ci-dessus sont indicatifs. Idéalement, l'évaluation de la maturité d'un procédé doit inclure le TRL, mais également la capacité et le nombre d'unités exploitées par le développeur de technologie.

Produits finaux

Les étapes de prétraitement et le niveau de contaminants résiduels sont des facteurs clés du rendement et de la qualité du produit recyclé obtenu. En effet, les impuretés peuvent présenter un problème pour les applications en aval, surtout si un matériau de haute qualité est requis. Ainsi, il semble que la façon la plus simple de traiter les impuretés soit de les éliminer au cours des étapes en amont. Les produits issus des procédés de recyclage chimique et physico-chimique peuvent également nécessiter des étapes supplémentaires (par exemple, des étapes de conversion en aval telles que la polymérisation des monomères, une étape de purification), en fonction des exigences du produit final.

Règlementation

Veillez noter que dans la section suivante, le terme générique "recyclage chimique et physico-chimique" est utilisé chaque fois qu'il n'est pas clair si la réglementation en question couvre ou non les technologies de dissolution.

Il n'existe actuellement pas de définition harmonisée des technologies de recyclage chimique et physico-chimique. Les réglementations existantes en matière de recyclage s'appliquent principalement aux technologies de recyclage mécanique, ce qui laisse planer un doute sur leur application aux technologies de recyclage chimique et physico-chimique. Ces technologies ne sont ni précisément définies ni classées, l'application des réglementations existantes n'est donc pas claire lorsqu'il s'agit de recyclage chimique et physico-chimique. De plus, celles-ci sont définies par zone géographique, ce qui rend d'autant plus complexe l'uniformisation des normes et réglementations en matière de recyclage chimique et physico-chimique. Les principales différences sont expliquées dans le tableau ci-dessous.

Chemical and physico-chemical recycling processes

The processes are presented by category in the study. However, it should be kept in mind that each technology developer has its own characteristic features (e.g., specific process, conditions, catalyst, etc.).

Most chemical and physico-chemical recycling technologies are still under development. The maturity of solvolysis processes is evaluated at the development phase, with some very specific methanolysis developers at a higher Technology Readiness Level (TRL around 8 in the best cases). Regarding dissolution technologies, these processes are evaluated at the development phase, with an average TRL of 5. Finally, the maturity level of thermal treatment technologies is higher compared to other chemical recycling processes, as the majority of the developers studied have a TRL ranging from 5 to 8, with some having industrial capacities.

Please note the TRL presented above are only indicative. Ideally, the assessment of the maturity of a process should include TRL, but also the size and number of units operated by a technology developer.

Outputs

The pre-treatment steps and the level of residual contaminants are key factors in the yield and quality of the output obtained. Indeed, impurities can represent an issue for downstream applications, especially if a high-quality material is required. Yet, it seems the easiest way to deal with impurities is to remove them during upstream steps. Outputs from chemical and physico-chemical recycling processes may also need further processing (e.g., downstream conversion steps such as polymerization of monomers, further purification), depending on the requirements for the final product.

Regulation

Please note that within the following section the generic term "chemical and physico-chemical recycling" was used whenever it was not clear if the regulation discussed also applied to dissolution technologies.

There is currently a lack of harmonized definition on chemical and physico-chemical recycling technologies. Existing recycling regulations mostly apply to mechanical technologies, leaving a doubt on their application to chemical and physico-chemical recycling technologies. These technologies are not clearly defined nor classified, and the application of existing regulations is thus unclear when it comes to chemical and physico-chemical recycling.

Moreover, there are differences between geographical areas, which do not allow for a level playing field regarding chemical and physico-chemical recycling. The main differences are explained in the table below.

⁴ TRL : technology readiness level, niveau de maturité technologique

	Europe	USA	Japan
Main regulatory and fiscal situations applicable to recycling plants	<ul style="list-style-type: none"> Recycling plants are subjected to laws and taxations that traditionally apply to the general category of producers/manufacturers Legislations on chemical and physico-chemical recycling are still being drafted on a European level Numerous discussions ongoing on chemical and physico-chemical recycling (definition and applicability) 	<ul style="list-style-type: none"> EPA counts several laws that every waste management facility must comply with (including the Resource Conservation and Recovery Act (RCRA)). Dozens of American states have passed bills to support chemical recycling facilities 	<ul style="list-style-type: none"> Facilities are subjected to the Waste management and Public Cleansing Law and Waste Treatment Facility Development Plan <i>Lack of information</i>
Opportunity to use recycled resins for food-contact applications	<ul style="list-style-type: none"> Monomers and oligomers resulting from chemical depolymerisation are subject to the same criteria as monomers manufactured by chemical synthesis, which are set by Regulation (EU) No 10/2011 on plastic materials and articles intended to come into contact with food EFSA approval needed Some hydrocarbon oils obtained from pyrolysis have been approved to be used in food-grade packaging 	<ul style="list-style-type: none"> Recycling materials must comply with the requirements of Chapter 21 of the Code of Federal Regulations, which is reserved for rules of the FDA Chemically recycled PET and PEN approved by FDA 	<ul style="list-style-type: none"> Chemically recycled PET already approved by the Japanese Food Safety Commission and the Ministry of Health, Labor and Welfare
Acceptability of the implementation of a mass balance approach	<ul style="list-style-type: none"> No legal framework Numerous discussions are ongoing on this topic As an example, this approach is not accepted in France by the current regulation 	<ul style="list-style-type: none"> Mass balance approach not mentioned in the legislation, it seems not to be accepted 	<ul style="list-style-type: none"> <i>Lack of information</i>
Departure from the status of waste	<ul style="list-style-type: none"> Definition from the Waste Framework Directive 2008/98/EC The adaptation of the EoW regulation to chemical and physico-chemical recycling is assumed to either be on hold (not progressing) or still under discussion 	<ul style="list-style-type: none"> Post-consumer plastics reclassified in 17 states to consider the pyrolysis and gasification facilities as manufacturing facilities Definitions of post-consumer waste may differ from one state to another 	<ul style="list-style-type: none"> Definition of waste from Waste management and Public Cleansing Law Lack of information on the departure from the status of waste
Qualification of production tools and qualification of products	<ul style="list-style-type: none"> Multiple certifications exist at a EU level to verify the production of tools and qualification products (Recycled Plastics Traceability Certification, EuCertPlast, REDcert, LNE / IPC, ...). 	<ul style="list-style-type: none"> Post-consumer (PCR) resin certification (includes the mass balance approach) 	<ul style="list-style-type: none"> TÜV Rheinland Japan certification
Acknowledgement of pyrolysis oil as a recycled material when used to produce new polymers	<ul style="list-style-type: none"> No official statement identified on this specific topic Based on the definitions, it seems that pyrolysis oil could be considered as a recycled material only if it used for new polymers production (not for fuel applications) 	<ul style="list-style-type: none"> The EPA is currently exploring the definition of recycling – no final decision has been made public Numerous discussions ongoing on the acknowledgment of pyrolysis oils as recycled material when used to produce new polymers. 	<ul style="list-style-type: none"> <i>Lack of information</i>

Focus sur l'approche « mass balance »

Les experts partagent certains points de vue, notamment sur le fait qu'il existe un manque de réglementation concernant l'approche « mass balance ». Dès qu'il y a une déconnexion entre le matériau entrant et le matériau sortant du procédé (par exemple l'huile de pyrolyse obtenue sur un site mais transformée en produits sur un autre site), la traçabilité devient un vrai défi. Des méthodes plus efficaces de traçabilité physique seraient préférables à une approche « mass balance ». Dans la mesure où il n'existe actuellement pas de telles méthodologies, l'approche « mass balance » peut être envisagée, mais son application doit être réglementée et rendue plus compréhensible pour les clients. En outre, la mise en œuvre d'une approche « mass balance » pourrait être considérée uniquement comme une phase de transition.

Cependant, les experts expriment également des points de vue divergents vis-à-vis de l'approche « mass balance ». Si certains d'entre eux estiment qu'un cadre juridique strict devrait être mis en place pour définir les applications de cette approche, d'autres considèrent que les futures réglementations devraient être flexibles pour encourager le développement des technologies de recyclage chimique.

Performance économique

La performance économique des technologies de recyclage chimique et physico-chimique reste encore à prouver. Cependant, on peut noter que la viabilité économique d'une usine est déterminée par plusieurs facteurs :

La capacité à respecter les spécifications du gisement est l'un des facteurs qui a le plus d'impact sur l'équation économique. Les volumes et la qualité des intrants jouent un rôle considérable sur la performance économique d'une usine :

- Premièrement, la qualité et le prix des intrants ont un impact direct et important sur les coûts opérationnels. L'impact de la qualité de la matière première sur le rendement est significatif car une mauvaise qualité diminue les revenus (en réduisant les volumes vendus par rapport au volume acheté), augmente la quantité de déchets produits et les coûts associés, et accroît la quantité de ressources nécessaires par unité produite, telle que l'énergie ou le solvant.
- L'usine est également dimensionnée en fonction de ces facteurs. Une faible qualité des intrants nécessitera d'acheter des équipements de plus grande capacité pour produire une certaine quantité de polymère visée. Compte tenu de l'impact massif des investissements initiaux sur la structure de coûts du recyclage chimique et physico-chimique, tout surdimensionnement du procédé et des équipements nuirait à la rentabilité de l'usine.

Les coûts des matériaux et de l'énergie peuvent également jouer un rôle significatif, notamment dans le cas de procédés qui en requiert une quantité importante (si aucune récupération d'énergie n'est mise en œuvre).

Des étapes supplémentaires, telles que la préparation des intrants, peuvent également entraîner des coûts significatifs, en particulier dans le cas d'intrants de qualité insuffisante. Il est également probable que d'autres traitements soient nécessaires (par exemple, un hydrotraitement, etc.) pour garantir que le produit final réponde aux spécifications requises. Du fait de ces étapes spécifiques, il est très compliqué de bien cerner l'ensemble des aspects économiques des procédés.

Il existe de **grandes incertitudes sur les coûts d'investissements** associés à la construction d'une usine de recyclage chimique et physico-chimique. Ces incertitudes

Focus on the mass balance approach

The experts share certain perspectives, notably the fact that there is a lack of regulation on the mass balance approach. Whenever there is a disconnection between the input and the output of the process (for instance pyrolysis oil obtained on one site but turned into products at a different site), traceability becomes a challenge. Improved physical traceability methods would be preferable to a mass balance approach. As there are no such methodologies currently, the use of mass balance should be considered but its application regulated and made understandable for customers. Moreover, the implementation of a mass balance approach might only be considered as a transition phase.

When it comes to mass balance, the experts also express divergent views. Although some of them consider a stringent legal framework should be put in place to define the applications of mass balance, other stakeholders believe that future regulations should be flexible to boost the development of chemical recycling technologies.

Economic performance

The economic performance of chemical and physico-chemical recycling technologies is still to be proven. However, it can be noted that the economic viability of a plant is determined by several criteria:

The ability to meet feedstock specifications is one of the criteria that most impact the economic equation. The feedstock volumes and quality play a tremendous role on the economics of a plant:

- *First, quality and price of the feedstock directly and largely impact the operational costs. The impact of the quality of the input on the yield is critical as it lowers the revenues (by lowering the volumes sold compared to the volume purchased), grows the amount of waste produced and the associated costs and increases the quantity of resources needed, such as energy or solvent, per unit produced.*
- *The plant structures are dimensioned on these criteria. Low quality feedstock will lead to the necessity of buying larger equipment to produce the targeted amount of polymer. Taking into account the massive impact of CAPEX on the cost structure of chemical and physico-chemical recycling, any oversize of the process and equipment would harm the economics of the plant.*

*The costs of **materials and energy** can also play an important role, especially in the case of energy or solvent-intensive processes (if no energy recuperation is implemented).*

Additional steps, such as the **input preparation** can also bear significant costs, especially in case of poor-quality feedstock. It is also likely that **further upgrading** will be necessary (e.g. hydro-treatment, etc.) to ensure the output will reach the required specifications. All these specific steps make it very complicated to fully capture the economics of the processes.

There are **high uncertainties on the investment costs** associated with building a chemical and physico-chemical recycling plant. These uncertainties are weighting on the costs and the sizing of the unit should thus be appropriate regarding the feedstock at hand. Moreover, start-up costs and working capital would also influence the investment costs. These aspects refer to the extra costs that may be

pèsent sur les coûts et le dimensionnement de l'unité doit donc être adapté en fonction des intrants à disposition. Il ne faut pas non plus négliger les coûts liés au lancement de l'activité et le besoin en fonds de roulement (coûts supplémentaires engendrés par la construction d'une première usine du genre, coûts liés au stockage des matériaux et des solvants...) qui influencent également les coûts d'investissement.

Performance environnementale

Méthodologies d'Analyse du Cycle de Vie (ACV) utilisées

Différentes méthodologies sont actuellement utilisées pour évaluer l'impact des technologies de recyclage chimique et physico-chimique. Ces méthodologies permettent parfois de comparer les résultats avec la production de matières vierges, la mise en décharge, l'incinération, le recyclage mécanique ou d'autres technologies de recyclage chimique et physico-chimique.

L'approche « cut-off » consiste à évaluer l'impact environnemental à partir des intrants (ce qui signifie que les déchets sont exempts de tout passif environnemental). Au contraire, la méthode de **substitution** permet de rendre compte de la double fonctionnalité du recyclage (traitement des déchets et production de nouveaux matériaux). Avec cette méthode, on considère que le procédé de recyclage permet d'éviter la phase d'incinération ou de mise à la décharge des déchets. On soustrait donc les impacts qui auraient été associés à l'incinération ou la mise en décharge, aux impacts environnementaux du polymère recyclé. **Lorsqu'il s'agit de comprendre et de comptabiliser les impacts environnementaux, la prise en compte des émissions évitées peut biaiser le système.** Cependant, d'un point de vue théorique, la capacité d'un procédé de recyclage à **générer un produit qui peut être réutilisé dans la fabrication des plastiques** doit être prise en compte dans l'équation. De fait, l'approche de substitution peut s'avérer nécessaire sur le plan méthodologique et favoriser la transition du secteur vers une économie plus circulaire.

Comparaison des procédés de recyclage chimique et physico-chimique avec d'autres traitements en fin de vie ou des procédés de production

D'un point de vue méthodologique, les procédés de recyclage chimique et physico-chimique peuvent être comparés à des **procédés de fin de vie**, tels que la mise en décharge ou l'incinération, ou à des **procédés de production de matière vierge**. Lorsque l'on compare la performance environnementale d'un matériau recyclé à celle de son homologue vierge, il faut tenir compte du **champ d'application du produit final**. En effet, la production de matériaux de qualité alimentaire par recyclage chimique et physico-chimique pourrait avoir un impact important sur l'environnement, en raison du nombre d'étapes supplémentaires nécessaires pour garantir cette qualité. Il convient donc de s'assurer que les émissions de CO₂ liées à la production d'un polymère recyclé chimiquement de qualité alimentaire ne sont pas supérieures à celles des matériaux vierges.

Les performances du recyclage chimique et physico-chimique et du **recyclage mécanique** sont souvent comparées entre elles. Cette comparaison est pertinente tant que la **qualité du produit obtenu par les différentes technologies de recyclage est similaire**. Le recyclage mécanique entraîne souvent la perte de propriétés et de qualité des polymères, ce qui résulte du mélange de différents grades de polymères. Parfois, les technologies de recyclage chimique et physico-chimique peuvent également être comparées entre elles. Cela peut s'avérer compliqué car il n'existe aucun polymère pouvant être recyclé par toutes les technologies.

involved due to the construction of a first-of-a-kind plant and to the need to store materials, solvents, etc.

Environmental performance

Life Cycle Analysis (LCA) methodologies used

Currently different methodologies are used to evaluate the impact of chemical and physico-chemical recycling technologies. These methodologies can sometimes compare the results with either virgin material production, landfilling, incineration, mechanical recycling or other chemical and physico-chemical recycling technologies.

*The **cut-off approach** is assessing the environmental impact from the feedstock (which means that the waste comes without any burden). On the contrary, the **substitution methodology** is applied to treat the double functionality of recycling (waste treatment and new material production). In this case, it is considered that the recycling process allows waste to be diverted from incineration or landfilling and thus deduct these associated impacts from the environmental impacts of the recycled polymer. When it comes to the understanding and accounting for environmental impacts, **considering avoided emissions can bias the system**. However, from a theoretical point of view, the ability of a recycling process to **produce an output that can be reused in plastics' manufacturing** has to be considered into the LCA equation. From this perspective, the substitution approach can be methodologically required and can favour the sector's transition towards a more circular economy.*

Comparison of chemical and physico-chemical recycling processes with other end-of-life treatments or production processes

*From a methodological point of view, chemical and physico-chemical recycling processes, could be compared to either **end of life processes**, such as landfilling or incineration, or **virgin production processes**. When comparing the recycled material environmental performance with its virgin counterpart, the **end-product application should be considered**. Indeed, producing food-grade material through chemical and physico-chemical recycling could be environmentally impactful, due to the number of additional steps necessary to ensure its quality. It should thus be ensured that CO₂ emissions related to the production of a food-grade chemically recycled polymer are not higher than the virgin materials.*

*Chemical and physico-chemical recycling and **mechanical recycling** performances are often compared with each other. This comparison is relevant as long as the **quality of the output produced by different recycling technologies is the same**. Mechanical recycling often leads to the loss of properties and quality of polymers which results from mixing different grades of polymers. Sometimes, chemical and physico-chemical recycling technologies can also be compared with one another. This can be challenging as there is no polymer that can be recycled by all technologies.*

Improvements of LCAs

Multiple aspects must be considered to improve environmental assessments. These include the availability of data, the existence or absence of common methodological rules, the extent to which differences in data robustness and process maturity are to be considered, etc. Regardless of the approach used to conduct a LCA, the methodology, hypotheses and

Améliorations des ACV

De multiples aspects doivent être pris en compte pour améliorer les évaluations environnementales. Peuvent être citées la disponibilité des données, l'existence (ou l'absence) de règles méthodologiques communes, dans quelle mesure les différences de qualité des données et de maturité des procédés doivent être prises en compte, etc. Quelle que soit l'approche utilisée pour réaliser une ACV, la méthodologie, les hypothèses et les références doivent toujours être clairement énoncées. Outre la quantité et la pureté du produit fini, d'autres facteurs tels que les consommations d'eau et d'énergie, la présence d'additifs et la zone géographique doivent être pris en compte lors de l'évaluation des procédés de recyclage. Il convient également de noter que les rendements des procédés, les étapes de prétraitement et de post-traitement peuvent avoir un impact significatif sur la performance environnementale d'une technologie, mais ces étapes sont généralement mal définies dans les ACV actuelles.

Perspectives de développement

Changement d'échelle d'une technologie

On peut noter que la **demande actuelle en matériaux recyclés est très élevée** (notamment pour les polymères recyclés à usage alimentaire) et que souvent, elle ne correspond pas à l'offre disponible. De fait, cette situation favorise le développement de technologies de recyclage chimique et physico-chimique. En effet, de nombreux projets ambitieux ont été annoncés et sont en cours de réalisation pour atteindre l'échelle industrielle d'ici 2025-2030. Reste à savoir si ces usines pourront démarrer avec succès. La plupart des technologies doivent encore être optimisées et les risques associés doivent être gérés et limités.

Ces procédés pourraient atteindre l'échelle commerciale d'ici 2030, à condition qu'il y ait **une adéquation entre la technologie et les intrants**. Par conséquent, la matière première doit être sélectionnée en fonction des produits souhaités. En outre, la courbe d'apprentissage de l'exploitation de ces technologies de recyclage doit être prise en compte, car il faut du temps pour comprendre quelles sont les exigences pour obtenir des rendements, une qualité et un prix satisfaisants.

La **construction de l'ensemble de la chaîne de valeur** est également essentielle lorsqu'on envisage le changement d'échelle d'une technologie. Le déploiement du recyclage chimique et physico-chimique à l'échelle commerciale nécessite l'accès à des volumes significatifs de déchets avec des spécifications appropriées. Des partenariats et une coopération avec les acteurs clés de la chaîne de valeur (par exemple avec les propriétaires de marques, les industries pétrochimiques, les fabricants de polymères, les universitaires, etc.) doivent être mis en œuvre de l'approvisionnement en matières premières à l'achat des matériaux recyclés. Enfin, des progrès techniques supplémentaires sont nécessaires sur les phases qui précèdent le recyclage chimique et physico-chimique (conception orientée vers le recyclage, la collecte, le tri, la traçabilité des déchets).

Les experts supposent que, dans tous les cas, les volumes de produits obtenus par recyclage chimique et physico-chimique ne représenteront **qu'une très petite partie de la demande totale** de polymères.

Facteurs externes à prendre en compte

L'évolution des technologies de recyclage chimique et physico-chimique pourrait être stimulée ou, au contraire, freinée par différents facteurs tels que les réglementations, les tendances en matière d'écoconception, les améliorations des modèles de collecte et les progrès en termes de tri ou de recyclage.

references should always be clearly stated. On top of capacity and output purity, other factors such as water and energy consumption, presence of additives and geographical area should be considered when evaluating recycling processes. It has also to be noted that process yields, pre-treatment and post-treatment steps can have a significant impact on the environmental performance of a technology, but these steps are usually poorly defined in current LCAs.

Perspectives of development

Scaling-up of a technology

*It can be noted that the **current demand for recycled materials is very high** (especially food-grade recycled polymers) and often does not match the supply available. Thus, this situation fosters the development of chemical and physico-chemical recycling technologies. Indeed, numerous ambitious projects have been announced and are in the pipeline to reach industrial scale by 2025-2030. The question remains on whether these plants will start-up successfully. Most technologies still need to be de-risked and optimized.*

*These processes could reach commercial scale by 2030 as long as there is a **proper match between the technology and the feedstock**. Therefore, feedstock needs to be selected based on the desired outputs. In addition, the learning curve of operating such recycling technologies has to be taken into account as time is needed to understand what the requirements are to reach acceptable yields, quality, and price.*

*The **building of the whole value chain** is also key when considering the scale-up of a technology. Deploying chemical and physico-chemical recycling at a commercial scale requires access to meaningful volumes of waste with the appropriate feedstock specifications. Partnerships and cooperation with key stakeholders along the whole value chain (e.g., brand-owners, petrochemical industries, polymer manufacturers, academics, etc.) should be implemented from feedstock supply to purchase of the recycled materials.*

Finally, further technical progress is required on the phases that come prior to chemical and physico-chemical recycling (design for recycling, collection, sorting, traceability of waste).

*Experts assume that, in all cases, the volumes of chemicals produced via chemical and physico-chemical recycling **will be a very small part of the total demand** of polymer chemicals.*

External drivers to be considered

The evolution of chemical and physico-chemical recycling technologies could be fueled or, at the opposite, constrained by different factors such as regulations, eco-design trends, collection models improvements and sorting or recycling progress.

*On the regulatory side, **future legislations** on plastics will impact the composition of waste and its available volumes. This trend can already be observed nowadays. Indeed, due to China ban on waste imports, some of the waste that used to be exported now remains in the EU. At first, strong regulations and financial incentives for chemical and physico-chemical recycling routes will also be necessary to support the industry.*

Sur le plan réglementaire, les futures législations sur les plastiques auront un impact sur la composition des déchets et leurs volumes disponibles. Cette tendance peut déjà être observée aujourd'hui. En effet, en raison de l'interdiction des importations de déchets par la Chine, une partie des déchets qui étaient exportés reste désormais dans l'UE. Dans un premier temps, des réglementations strictes et des incitations financières pour les filières de recyclage chimique et physico-chimique seront également nécessaires pour soutenir l'industrie.

En outre, **des efforts d'éco-conception** sont actuellement déployés pour faciliter le recyclage des produits plastiques. L'industrie évolue déjà pour assurer un meilleur tri et un meilleur recyclage des matériaux mis sur le marché. L'accès à des matières premières de meilleure qualité favorisera non seulement les recycleurs mécaniques, mais présentera également une opportunité pour les recycleurs chimiques. La viabilité économique de leurs procédés sera en effet améliorée en réduisant les besoins de tri et de purification additionnels. Il est également probable que les technologies de tri et de recyclage mécanique s'améliorent à l'avenir. Ces progrès devraient avoir un impact sur les volumes de déchets disponibles pour les recycleurs chimiques.

Conclusion

D'après les annonces publiques des développeurs de technologies, les capacités de recyclage chimique et physico-chimique devraient fortement augmenter dans les cinq prochaines années. Si l'industrie parvient à atteindre une échelle commerciale, le recyclage chimique et physico-chimique deviendra une solution complémentaire pour aider à pallier les limites du recyclage mécanique. Pourtant, certaines incertitudes subsistent, car ces procédés sont toujours en cours de développement, et leur viabilité économique ainsi que leurs impacts environnementaux demeurent encore incertains. Il est donc nécessaire de disposer de davantage de données technico-économiques et d'études ACV, entre autres, pour saisir pleinement les défis des technologies de recyclage chimique et physico-chimique et pour répondre aux potentielles préoccupations des propriétaires de marques, des recycleurs, des législateurs et des autres acteurs de la chaîne de valeur.

Le principal obstacle au développement de ces technologies de recyclage chimique et physico-chimique provient du manque de structure de l'ensemble des chaînes de valeur. Les flux de déchets ciblés ne semblent pas être sécurisés et sont, pour le moment, principalement destinés à l'incinération ou la mise en décharge. Des partenariats avec des acteurs clés doivent encore être mis en place afin de garantir l'accès à des matières premières en quantité et qualité suffisantes. L'incertitude réglementaire sur le recyclage chimique et physico-chimique à travers le monde présente également un défi de taille. Notamment, aucune zone géographique ne s'est encore prononcée sur la définition de "matériau recyclé chimiquement" et sur les technologies éligibles à cette dénomination. Par ailleurs, la mise en œuvre d'une approche « mass balance » suscite actuellement des débats entre les différents acteurs (autorités publiques, industries pétrochimiques, ONG, etc.) et ne semble être acceptée dans aucune des régions étudiées.

L'adaptation des réglementations existantes, l'amélioration des étapes de collecte et de tri, la mise en œuvre de l'éco-conception, aideront les procédés chimiques à s'étendre à l'échelle commerciale en levant certaines incertitudes qui ralentissent le développement de cette industrie.

*Moreover, **eco-design efforts** are currently being made to facilitate recycling of plastic products put on the market. The industry is already evolving to ensure better sorting and recycling of materials put on the market. Having access to better quality feedstocks will not only favor mechanical recyclers, but it will also be an advantage for chemical recyclers. The economic viability of their processes will indeed be improved by reducing the need for additional sorting and purification. It is also likely that sorting and mechanical recycling technologies will improve in the future. This progress is expected to impact the volumes of available waste for chemical recyclers.*

Conclusion

According to public announcements made by technology developers, chemical and physico-chemical recycling capacities are expected to tenfold within the next five years. If the industry was to succeed to reach commercial scale, chemical and physico-chemical recycling would become a complementary solution to help overcoming the limitations of mechanical recycling. Yet, uncertainties remain as these processes are still under development and there is still questioning related to aspects such as economic viability and environmental impacts. There is thus a need for more technical-economic data and LCA studies, among others, to fully capture the challenges of chemical and physico-chemical recycling technologies and answer potential concerns from brand owners, recyclers, legislators, and the other stakeholders of the value chain.

The main obstacle that was identified hindering the development of chemical and physico-chemical recycling technologies come from the lack of structure of the whole value chains. Targeted waste streams do not seem to be secured and are mostly directed to incineration or landfill. Partnerships with stakeholders still need to be put in place in order to ensure access to feedstocks of sufficient volumes and quality.

Regulatory uncertainty on chemical and physico-chemical recycling across the world is also a challenge. Notably, no geography has yet ruled on the definition of "chemically recycled material" and the technologies that are eligible for such denomination. Moreover, the implementation of a mass balance approach currently generates debates among various stakeholders (public authorities, petrochemical industries, NGOs, etc.) and seems not to be accepted in any of the regions studied.

Adaptation of existing regulations, improvements at the collection and sorting steps, implementation of eco-design, can help chemical processes expand to commercial stage by removing some uncertainties that are slowing down the development of this industry.