

SYNTHESE / EXTENDED ABSTRACT
FRANÇAIS / ENGLISH

**RECYCLAGE CHIMIQUE DES DECHETS PLASTIQUES :
SITUATION ET PERSPECTIVES
ETAT DE L'ART ET AVIS D'EXPERTS**

**PLASTIC WASTE CHEMICAL RECYCLING:
SITUATION AND PERSPECTIVES
STATE-OF-THE-ART AND EXPERT PANEL**

octobre 2015

C. DELAVELLE – AjBD
B. DE CAEVEL – RDC Environment



Créée en 1989 à l'initiative du Ministère en charge de l'Environnement, l'association RECORD – REseau COopératif de Recherche sur les Déchets et l'Environnement – est le fruit d'une triple coopération entre industriels, pouvoirs publics et chercheurs. L'objectif principal de RECORD est le financement et la réalisation d'études et de recherches dans le domaine des déchets et des pollutions industrielles.

Les membres de ce réseau (groupes industriels et organismes publics) définissent collégalement 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, Recyclage chimique des déchets plastiques : Situation et perspectives. Etat de l'art et avis d'experts, 2015, 58 p, n°13-0242/1A
- ✓ Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie)
www.ademe.fr

© RECORD, 2015

RESUME

Le recyclage chimique présente l'avantage de pouvoir traiter, sous réserve de prétraitements appropriés, des flux de déchets plastiques mélangés à des inertes ou souillés par des matières organiques inséparables, des mélanges de différents plastiques, de différents grades ou de différents additifs, pour lesquels le recyclage mécanique n'est pas possible pour des raisons techniques ou économiques.

La voie « énergétique », consistant à fabriquer des combustibles liquides ou gazeux (en particulier par gazéification et par pyrolyse) présente un potentiel de développement plus élevé que la voie « retour à la matière » consistant à fabriquer des bases chimiques utilisables dans une étape ultérieure pour la synthèse de nouveaux produits chimiques.

Les perspectives de développement du recyclage chimique des déchets plastiques à court et moyen termes sont incertaines. Les procédés sont handicapés par des coûts élevés en raison des faibles capacités et de la complexité technologique. Leur rentabilité, à quelques exceptions près, ne pourrait donc provenir que d'une contrainte sur le marché, soit légale (obligation de recyclage), soit d'image (volonté de producteurs de montrer le caractère recyclable de leurs produits en plastique).

Le degré de développement du recyclage chimique est contrasté selon les pays européens. En France, malgré l'existence d'une R&D active ayant conduit à de nombreux pilotes et démonstrateurs, aucun projet industriel de gazéification ou de pyrolyse des déchets plastiques ne s'est concrétisé de façon pérenne.

Le contexte français est peu propice à l'émergence d'installations industrielles de recyclage chimique des déchets plastiques : statut réglementaire trop rigide de la gazéification, lourdeur des procédures d'obtention des autorisations d'exploitation, rareté des gisements de déchets plastiques stables et d'une qualité suffisante à un coût acceptable, tarifs de rachat de l'électricité peu avantageux.

MOTS CLES

Recyclage chimique, Gazéification, Pyrolyse, Solvolyse, Déchets plastiques, Avis d'experts.

SUMMARY

Provided that an appropriate pre-treatment of the waste is done, chemical recycling is able to process plastic waste mixed with inert materials, or soiled by non-separable organic materials, mixtures of polymers or grades, for which mechanical recycling cannot be envisaged on a technical and economic viewpoint.

The « energy route » consisting to manufacture liquid or gaseous fuels (especially by gasification and pyrolysis) has a greater short / medium term potential development than the « chemical route » consisting to recycle plastic waste into chemical intermediates which can be reprocessed in a further step into new chemical products.

Plastic waste chemical recycling faces many constraints, especially high costs due to small capacities and complexity of processes. Its profitability, with few exceptions, does not seem possible without a regulatory obligation to recycle, or the willingness of producers to show the recyclability of their plastic products.

The industrial development of chemical recycling is contrasted among the EU countries. Despite strong R&D efforts and many pilots and demonstrators in operation, no economically viable gasification plant for plastic waste has been built up-to-now in France.

The French context is not favorable to the development of plastic waste chemical recycling plants: too stringent regulatory status of gasification, heavy procedures to get operation agreements, difficult access to regular plastic waste flows having an acceptable quality and price, low prices of "green" electricity.

KEY WORDS

Chemical Recycling, Gasification, Pyrolysis, Solvolysis, Plastic waste, Expert panel.

Objectifs et champ de l'étude

Objectifs

Les procédés de recyclage chimique constituent une piste pour augmenter le taux de valorisation matière des déchets plastiques à court et moyen-terme. Ils ouvrent en particulier des perspectives pour le traitement de déchets souillés et / ou mélangés qui, pour beaucoup, sont mis en enfouissement¹.

Les auteurs ont donc réalisé une étude entre janvier 2014 et mars 2015 pour le compte de l'association RECORD, dont les objectifs sont les suivants :

- établir une revue de cadrage du recyclage chimique des déchets plastiques sur la base d'une analyse bibliographique, afin de disposer d'une vue d'ensemble cohérente de la situation actuelle et des perspectives ;
- réaliser un "avis d'experts", à travers l'animation d'un groupe de travail international, afin d'identifier les tendances, les technologies actuellement envisagées en recyclage chimique des déchets plastiques, les freins et points de blocage de toutes natures, les points faisant consensus et les points de désaccord.

Champ de l'étude

Le champ géographique de l'étude est mondial.

L'étude couvre le recyclage chimique au sens large. Elle inclut les procédés basés sur des réactions en milieu "solvant" (solvolysé, dissolution) ainsi que les procédés de gazéification, de pyrolyse lente et de pyrolyse rapide (dépolymérisation).

L'expression "déchets plastiques" englobe non seulement les flux mono-matière tels que les déchets de l'industrie de transformation des matières plastiques, mais également les flux de déchets contenant une proportion de matières plastiques en mélange avec d'autres matériaux (résidus de broyage, CSR...).

Méthodologie

Une approche en trois phases

L'étude a été réalisée en trois phases : La première phase a consisté en une revue bibliographique de cadrage et a également permis de constituer le groupe d'experts. La deuxième phase a déroulé le processus d'animation du groupe d'experts. Elle s'est articulée autour d'un ou deux entretiens (selon les cas) avec chaque expert et de plusieurs séquences de validation/discussion par les experts de synthèses intermédiaires préparées par les auteurs. Une synthèse finale a enfin été soumise à chaque expert pour commentaires et suggestions.

Les avis présentés dans cette synthèse sont parfois consensuels mais le plus souvent individuels. En effet, les avis portent souvent sur des aspects spécifiques car chaque expert est spécialisé sur un ou plusieurs domaines pointus. La restitution dans ce rapport des avis et idées exprimées par le groupe d'experts ne signifie aucunement que les auteurs ou le Comité de Pilotage de l'étude les partagent.

Composition du groupe d'experts

Un groupe de 15 experts a été constitué, avec les caractéristiques suivantes :

- Répartition par pays : France : 7 ; Belgique : 4 ; Allemagne : 1 ; Canada : 1 ; Chine : 1 ; Japon : 1.
- Répartition par " métiers " : chercheurs : 6 ; exploitants industriels : 5 ; développeurs de procédés : 2 ; association professionnelle : 1 ; enseignant : 1.

Un bon niveau de consensus entre les experts

Nous n'avons pas observé de désaccord profond entre les experts interrogés sur la situation actuelle du recyclage chimique

Objectives and scope of the study

Objectives

Chemical recycling could contribute in the short and medium-term to increase material recycling of soiled and /or mixed plastic waste. Indeed, a high proportion of this waste is still going to landfill⁵.

In this context, the Authors have performed a study on behalf of the association RECORD during the period January 2014 / March 2015, with the following objectives:

- *carry-out a bibliographic review of plastic waste chemical recycling at world level, in order to get a coherent view of the current situation and perspectives ;*
- *collect "expert opinions" by animating an international panel of experts, in order to identify the technological trends, brakes and constraints of plastic waste chemical recycling, as well as the points of consensus and points of divergence.*

Scope of the study

The geographical scope is worldwide.

The study includes both the processes performed in a solvent medium (solvolysis, dissolution) and the thermal or catalytic processes, namely gasification as well as slow and quick pyrolysis (depolymerisation).

The wording "Plastic waste" includes not only the mono-material waste flows as plastic processing waste but also all kinds of waste containing a significant proportion of plastics mixed with other materials (shredder residue, RDF...).

Methodology

A three-step approach

The study was performed in three steps: the first step consisted in a comprehensive bibliographic review and the selection of the expert panel. The second step was dedicated to the animation of the expert panel. One interview (sometimes two) has been performed with each expert and then a validation by each expert of many intermediate synthesis prepared by the Authors. A final synthesis was eventually submitted to each expert, for comments and suggestions.

The expert opinions presented in this synthesis are sometimes consensual but most of the time individual. Indeed, these opinions often deal with specific aspects, a given expert being generally specialized on one domain of expertise. In consequence, the opinions expressed are not necessarily shared by the authors and by the Steering Committee of the study.

Composition of the expert panel

A panel of 15 experts has been set-up, with the following characteristics:

- *By country: France: 7 ; Belgium: 4 ; Canada: 1 ; China: 1 ; Germany: 1 ; Japan: 1.*
- *By skills: researchers: 6 ; plant operators: 5 ; process designers: 2 ; professional association: 1 ; university teacher: 1.*

A good degree of consensus among the experts

As far as the current situation of plastic waste chemical recycling in France and in the world is concerned, we have not depicted any major divergence among the experts of the panel. Concerning the short / medium-term perspectives, the sole significant point of divergence is the

des déchets plastiques en France et dans le monde et sur ses perspectives de développement à court et moyen terme. Le seul point de divergence notable identifié au cours des échanges avec les experts concerne les perspectives de développement industriel des procédés de dissolution.

Degré de développement actuel du recyclage chimique

Plusieurs procédés de recyclage chimique des déchets plastiques ont atteint le stade industriel dans le monde, mais le nombre d'unités recensées reste faible. La France est quasiment absente de ces développements industriels :

- La gazéification et la pyrolyse rapide (dépolymérisation) commencent à se développer en Europe au plan industriel (en Italie, Grande-Bretagne, Finlande...), mais pas en France. Nous avons recensé une vingtaine d'unités industrielles de gazéification en exploitation ou en démarrage (+2 ou 3 en construction) dans le monde et 1 à 8 unités de pyrolyse rapide / dépolymérisation². Ces installations se heurtent souvent à des problèmes techniques (bouchage, corrosion...), de qualité des produits de sortie (goudrons dans le gaz de synthèse, hétérogénéité des huiles de pyrolyse) et toujours à des problèmes de coût.
- Les procédés de solvolys "douce" et de dépolymérisation thermique des déchets textiles propres (polyester, Nylon 6) ne se sont pas développés en France, contrairement aux pays ayant une production importante de textiles synthétiques, pour des raisons tenant à la faiblesse du gisement de déchets de production et à l'hétérogénéité des produits de réaction (manque de compétitivité par rapport au recyclage mécanique).
- La dissolution de toiles et câbles usagés en PVC (procédés Vinyloop / Taxyloop) est exploitée dans une unité industrielle en Italie mais n'a pas essaimé du fait de ses coûts opératoires élevés. La faisabilité technique est démontrée mais la pérennité requiert une forme de subsidiation par les producteurs, soit volontaire comme c'est le cas avec l'unique installation existante, soit obligatoire s'il y a des objectifs légaux de recyclage (mais il n'y en a pas actuellement).

Perspectives à moyen terme du recyclage chimique des déchets plastiques

A quels types de déchets plastiques s'adresse le recyclage chimique ?

La gazéification présente l'avantage de pouvoir traiter des déchets plastiques mélangés et souillés, y compris des mélanges multi-matériaux (OMR, DIB, refus de tri de recyclables légers, refus de tri de RBA et RBE). Toutefois, les déchets plastiques étant pétrosourcés, cela peut conduire à des problèmes techniques (bouchages et blocages suite à des dépôts de suie, corrosion et dégradation des installations) et à une moindre qualité des produits sortants (teneur en contaminants, variabilité de composition). Les réacteurs à lit fluidisé et à lit à flux entraîné couvrent le champ le plus large en

probability of industrial development of dissolution processes.

Current industrial development of plastic waste chemical recycling

Several chemical recycling processes have already reached the industrial step. However, the number of plants worldwide remains low. Moreover, no plant has been identified in France:

- *Some plastic waste gasification and quick pyrolysis (depolymerisation) plants have been built in Europe (Italy, Great-Britain, Finland...) during the last five years. About 20 gasification plants have been inventoried at world level (including plants which are at the start-up phase) as well as 1 to 8 quick pyrolysis / depolymerisation plants⁶. Some of them are facing operating problems (blocking, corrosion...) as well as difficulties dealing with the low quality of end-products (high tar content in the syngas, heterogeneity of the pyrolysis oil) and always with high costs.*
- *Clean textile waste solvolysis and thermal depolymerisation (polyester, Nylon 6) has developed in the countries having a significant amount of synthetic fibers production. It is not the case in France, the quantity of production waste available being low and the end-products being heterogeneous (lack of competitiveness compared with mechanical recycling).*
- *Used PVC tarpaulins and electric cables dissolution (Vinyloop and Taxyloop processes) are operated in only one plant (in Italy) because of its high operating costs. Despite a good technical performance, the perenity of these processes would require some kind of subsidiation by the products manufacturers (as it is the case for the existing plant), or some regulatory support (which is not the case for the time being).*

Medium-term perspectives for plastic waste chemical recycling

Which types of plastic waste is appropriate for chemical recycling?

Gasification processes can treat soiled and mixed plastic waste, including multi-material waste as residual household waste, non-hazardous industrial waste, refusals from household waste sorting and some refusals from ELV and WEEE shredder residue. However, the presence of fossil-plastics in the waste is a drawback as it may generate technical problems (blocking and clogging) due to char deposits and to the corrosion of equipment. The presence of contaminants in the end-products and the variability of waste composition may also be a strong constraint. Fluidized bed reactors and entrained flow reactors are able to treat a wide spectrum of plastic waste, while fixed bed reactors are very limited.

¹ Le taux de recyclage des plastiques observé en France est l'un des plus faibles de l'Union européenne (25^{ème} position) (source : ADEME).

⁵ France has one of the lowest plastic waste recycling rate in the EU (Ranking 25) (source: ADEME).

² Il s'agit là de minima, car la présente étude n'a pas pour objectif de dresser un inventaire exhaustif des installations. D'autre part, la largeur de ces fourchettes est due à l'incertitude sur la réalité industrielle de certaines installations revendiquées par des concepteurs de procédés, qui pourraient être des démonstrateurs, voire être à l'arrêt.

⁶ These figures should be considered as minima. Indeed the objective of the study is not to make a comprehensive inventory of the plastic waste chemical recycling plants in operation worldwide. Besides, the width of the range is due to the uncertainty about plants which are claimed by process designers. Some plants identified may be demonstrators or even be stopped.

termes de déchets. Les réacteurs à lit fixe couvrent un champ plus restreint.

La dépolymérisation thermique avec retour aux monomères convient bien au traitement des déchets propres et homogènes de polymères tels que le PMMA, le PS et le Nylon 6. Les monomères issus du recyclage sont ensuite repolymérisés dans une étape ultérieure en produits dont les caractéristiques et les performances sont plus proches de celles des plastiques vierges que les produits issus du recyclage mécanique. La dépolymérisation présente en outre l'avantage de pouvoir se débarrasser des contaminants (additifs...) contenus dans les déchets plastiques. Elle permet également de traiter des déchets hétérogènes (exemple du recyclage du Nylon 6 contenu dans les tapis et revêtements de sols).

La pyrolyse rapide (dépolymérisation thermique ou catalytique) est bien adaptée au traitement des déchets plastiques homogènes, à condition qu'ils ne soient pas trop souillés (par exemple, la présence de papier et de cuir en proportions trop élevées entraîne une dégradation des rendements de réaction). La présence de produits chlorés et de métaux lourds constitue également un obstacle. La pyrolyse rapide est envisageable pour traiter des refus de tri de recyclables issus du tri des ordures ménagères, des résidus de broyage légers et des déchets en mélange issus de la production et de la transformation des plastiques.

La voie énergétique présente des perspectives meilleures que la voie chimique

Dans le cas de la gazéification des déchets plastiques, la voie énergétique (gazéification → turbine à gaz → électricité) présente des perspectives de développement meilleures que la voie chimique (gazéification → bases chimiques → synthèses chimiques ultérieures). Cette dernière s'avère totalement fermée pour le moment car elle fait face à de nombreux obstacles. La voie "carburant automobile" est envisageable à plus long terme. La co-combustion du gaz de synthèse en cimenterie pourrait également constituer une piste intéressante, la plupart des cimenteries françaises ayant atteint leur seuil limite légal d'utilisation de combustibles de substitution.

Dans le cas de la pyrolyse rapide (dépolymérisation) des déchets plastiques, l'utilisation des huiles de dépolymérisation dans des installations de cogénération en vue de la production de chaleur et d'électricité est la voie de valorisation la plus porteuse à moyen terme. La production de carburants automobiles par transformation de l'huile de pyrolyse est envisageable à plus long terme.

Quelles sont les capacités optimales de production ?

Compte tenu des contraintes relatives aux difficultés d'approvisionnement en déchets plastiques, il y a consensus au sein des experts interrogés sur le fait qu'il est préférable d'envisager des unités de taille "raisonnable", soit 10 000 à 50 000 t/an de déchets traités dans le cas de la gazéification et 8 000 à 15 000 t/an dans le cas de la dépolymérisation.

Les freins à surmonter restent nombreux

Les contraintes d'approvisionnement en déchets plastiques

Les gisements de déchets plastiques disponibles pour le recyclage chimique se limitent aux déchets mélangés et / ou souillés ne pouvant être traités dans des conditions économiques acceptables ou étant trop contaminés pour être recyclés mécaniquement. Le recyclage chimique s'adresse donc à des flux de plastiques ayant au moins une des caractéristiques suivantes (qui les empêchent d'aller vers le recyclage mécanique):

- mélangés à des inertes, souillés par des matières organiques inséparables...

"Back to monomers" thermal depolymerisation processes are relevant for clean and homogeneous polymer waste as PMMA, polystyrene and Nylon 6. The monomers obtained can be transformed in a further step in polymers having characteristics and performances which are closer to virgin polymers than the polymers obtained by mechanical recycling. Moreover, depolymerisation is an opportunity to remove easily some contaminants (additives...) contained in the waste. This process is also able to recycle heterogeneous waste, such as Nylon 6 contained in carpets and floorings.

Quick pyrolysis (depolymerisation) is suitable for the treatment of plastic waste, provided that it is not too soiled by other materials (for example, a high paper and leather content in the waste may lead to lower reaction yields). The chlorine and heavy metals content must also be controlled. Quick pyrolysis is relevant, among other waste, for the recycling of refusals from household waste sorting, light shredder residues and mixed polymers waste from the plastic processing industry.

The "energy route" has better short / medium term perspectives than the "chemical route"

As far as plastic waste gasification is concerned, the route "gasification → gas turbine (or gas engine) → electricity" has better short/medium term perspectives of development than the route "gasification → chemical basis → further chemical synthesis", which faces many obstacles. The route consisting to synthesize diesel gasoline for cars can also be envisaged, but only in the long-term. Co-combustion of the syngas in cement plants is also a promising route, most French cement plants having already reached the maximum proportion of substitution fuels legally authorized.

For quick pyrolysis (depolymerisation), the use of pyrolysis oil in cogeneration plants for the production of heat and power is a promising route for the medium-term. The synthesis of diesel gasoline for cars from pyrolysis oil can be envisaged, but only in the long-term.

What is the optimum capacity of a chemical recycling plant?

Given the constraints dealing with the availability of plastic waste, there is a consensus among experts for plants having a "reasonable" size (10 000 to 50 000 tons/year of waste treated in the case of gasification; 8 000 to 15 000 tons/year in the case of depolymerisation).

Many obstacles still prevent the development of plastic waste chemical recycling

Availability of plastic waste

Plastic waste available for chemical recycling is the one which cannot be mechanically recycled at acceptable economic conditions, namely plastic waste which is too much soiled or mixed. Therefore, chemical recycling addresses in priority three types of plastic waste:

- plastics soiled by inert materials and mixed with non-separable organic substances
- mixtures of various polymers or various grades, presence of additives which significantly modify the characteristics of the materials
- used carbon fiber / epoxy composites.

Contaminants in the waste

The quality of gasification and pyrolysis end-products is strongly affected by the presence of chlorine, heavy metals, silicones, thermosets and inert materials in the waste. The industry operators expect improvement of the

- mélanges de différents plastiques ou de différents grades, présence d'additifs qui changent sensiblement les caractéristiques
- composites.

La présence de contaminants dans les charges

La qualité des produits de réaction des procédés de dépolymérisation et de gazéification peut-être fortement affectée par la présence de contaminants indésirables dans les déchets à traiter, tels que le chlore, les métaux lourds, les silicones, les thermodurcissables et les inertes. Les attentes des industriels sont fortes pour améliorer le rapport performance/coût des technologies de préparation des charges. En outre, il existe une forte attente pour pouvoir mieux contrôler en continu les fluctuations des teneurs en contaminants et du PCI des déchets à l'entrée du réacteur.

La qualité insuffisante des gaz de réaction

Les industriels sont confrontés au problème récurrent des teneurs élevées en goudrons et autres contaminants dans les gaz produits par les procédés de gazéification et de pyrolyse. Les traitements aval nécessaires génèrent des surcoûts importants.

Une équation économique incertaine

Les technologies de gazéification et de pyrolyse rapide se heurtent à des problèmes de coût qui semblent, pour l'instant, leur fermer la porte de la viabilité industrielle. Elles sont rarement rentables par rapport à la valorisation thermique ("Waste to Energy"), voire à l'élimination (mise en décharge, incinération). En outre, il faut garder à l'esprit le fait que la rentabilité du recyclage chimique ne doit pas être évaluée uniquement sur la base de son prix de revient. Le plus gros problème est la faible marge commerciale, avec des prix élevés des déchets plastiques à l'entrée et des prix bas de la vapeur, du gaz ou de l'électricité à la sortie.

Les procédés de solvolysse "douce" ne sont pas compétitifs vis-à-vis des procédés de recyclage mécanique. En effet, les coûts opératoires sont élevés, les produits de sortie sont constitués de mélanges complexes et les gisements de déchets propres et homogènes sont très restreints en France, qu'il s'agisse de déchets de production ou de déchets post-consommateurs.

Le cas particulier des déchets de composites

La pyrolyse lente convient bien au traitement industriel des déchets de composites fibres de carbone/époxy. Paradoxalement, ce type de procédé de recyclage s'est développé au plan industriel dans plusieurs pays d'Europe mais pas en France, alors que cette dernière dispose d'un secteur aéronautique puissant. L'étude n'a pas permis d'identifier la (les) cause(s) de cette situation. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que les fibres recyclées obtenues par pyrolyse des composites ont des performances trop médiocres par rapport aux fibres neuves.

Conclusion

Des perspectives incertaines et plusieurs questions en suspens

Il apparaît clairement que la voie "retour à la matière", c'est-à-dire des produits de réaction constitués de produits chimiques qui seront utilisables dans une étape ultérieure pour la synthèse de nouveaux produits chimiques n'est pas porteuse de développements industriels à court-terme et que c'est au contraire la voie "énergétique" qui a le plus de potentiel de développement.

performance/cost ratio of waste preparation technologies and improvement of real-time monitoring of contaminants fluctuations at the entrance of the reactors.

Low quality of the syngas

The tar (and other contaminants) content in the syngas is frequently a major problem. It requires expensive cleaning end-processes.

Business models are still fragile

Gasification and quick pyrolysis technologies are generally not competitive with energy recovery (incineration), co-combustion in cement plants or landfilling. It is not only a question of capital and operating costs. The main problem is due to the high prices of inputs (waste) and low prices of outputs (steam, gas and power).

Solvolytic technologies are not competitive with mechanical recycling because of their high operating costs. Moreover, the tonnages of clean and homogeneous waste available is low and the end-products are made of complex mixtures.

Chemical recycling of used composites has also a potential of development

Slow pyrolysis is suitable for the processing of used carbon fiber / epoxy composites. Paradoxically, many plants are in operation in the European-Union but not in France, despite the high degree of development of the aeronautical sector in this country. Although the reasons are not clearly identified, it could be due to the fact that the performances of the recycled fibers obtained by slow pyrolysis are too low compared to the market expectations.

Conclusion

Perspectives are uncertain and several questions are still pending

The "energy route" is the more promising for the short / medium term than the "chemical route" consisting to recycle plastic waste into chemical intermediates which can be reprocessed in a further step into new chemical products.

Provided that appropriate pre-treatment of the waste is done, the great advantage of chemical recycling is to be able to process plastic waste which is mixed with inert materials or soiled by non-separable organic materials, mixtures of polymers or grades, for which mechanical recycling cannot be envisaged on a technical and economic viewpoint.

However, plastic waste chemical recycling still faces many constraints, especially high costs due to small capacities and complexity of processes. The profitability, with few exceptions, does not seem possible without a regulatory obligation to recycle or specific incentives (such as the willingness of the producers to improve their image).

For the time being, the potential of development of chemical recycling plants being technically and economically viable remains limited to:

- slow pyrolysis of used carbon fiber / epoxy composites
- high pressure and temperature solvolysis of used composites
- depolymerisation of clean PMMA clean waste

Another promising target for chemical recycling is the quick pyrolysis of shredder residue from ELV and WEEE and of

Le recyclage chimique présente l'avantage de pouvoir traiter, sous réserve de prétraitements appropriés des déchets, des flux de plastiques mélangés à des inertes ou souillés par des matières organiques inséparables, des mélanges de différents plastiques, de différents grades ou de différents additifs, pour lesquels le recyclage mécanique n'est pas possible.

Toutefois, les perspectives de développement du recyclage chimique des déchets plastiques à court et moyen termes sont incertaines. Il est handicapé par des coûts élevés³ en raison des faibles capacités et de la complexité technologique. Sa rentabilité, à quelques exceptions près, ne pourrait donc provenir que d'une contrainte sur le marché, soit légale (obligation de recyclage), soit d'image (volonté de producteurs de montrer le caractère recyclable de leurs produits).

Les seules pistes identifiées pour lesquelles le recyclage chimique présente des perspectives favorables à court terme concernent trois "niches d'activités" :

- pyrolyse lente des déchets de composites fibres de carbone / époxy
- solvolysé sous pression et en température des composites usagés
- dépolymérisation de déchets propres de PMMA.

Une autre piste en est au stade "pilote prometteur" (pyrolyse rapide du RBA, des refus de tri de DEEE et des refus de tri des recyclables légers) mais sa rentabilité intrinsèque n'est pas démontrée.

L'état des lieux décrit dans le présent rapport a mis en évidence des degrés de développement contrastés du recyclage chimique selon les pays européens. En France, malgré l'existence d'une R&D active ayant conduit à de nombreux pilotes et démonstrateurs⁴, on constate qu'aucun projet industriel de gazéification ou de pyrolyse des déchets plastiques ne s'est concrétisé de façon pérenne.

Plusieurs experts ont souligné les contraintes spécifiques à la France, telles que le statut réglementaire trop rigide de la gazéification, la lourdeur des procédures d'obtention des autorisations d'exploitation, la difficulté de trouver des gisements de déchets stables et d'une qualité suffisante à un coût acceptable (en particulier pour le CSR) et des tarifs de rachat de l'électricité peu avantageux.

Ce constat suscite plusieurs questions :

- la France a-t-elle un "retard" par rapport à des pays comme la Grande-Bretagne, la Finlande ou l'Italie, où bien au contraire cette situation est-elle le résultat logique d'une politique assumée, s'appuyant sur des choix techniques qui privilégient d'autres formes de valorisation des déchets plastiques difficiles à recycler mécaniquement ?
- en corollaire, l'existence de leviers de nature réglementaire (obligation de recyclage), fiscale (tarif élevé de reprise de l'électricité) ou d'image (volonté de producteurs de montrer le caractère recyclable de leurs produits) a-t-elle eu un effet catalyseur sur les investissements dans les pays où le recyclage chimique des déchets plastiques a commencé à se développer ?

refusals from household waste sorting. However, it is still at the pilot stage and the profitability is not fully demonstrated.

The industrial development of chemical recycling is contrasted among the EU countries. Despite strong R&D efforts and many pilots and demonstrators in operation⁷, no economically viable gasification plant has been built up-to-now in France.

Many experts have pointed-out constraints which are specific to France and prevent the development of plastic waste chemical recycling, namely: too stringent regulatory status of gasification, heavy procedures to get operation agreements, difficult access to stable plastic waste flows having an acceptable quality and price and low prices of "green" electricity.

These remarks raise four questions:

- *The reason(s) why plastic waste chemical recycling has not developed in France as quickly as in the United-Kingdom, Finland or Italy is (are) not clear. Is it the consequence of the above mentioned constraints or, conversely, is it the result of a French voluntarist public policy based on technological choices which foster other recycling technologies?*
- *Many countries (other than France) have set-up policies based on regulatory (obligation to recycle), fiscal (high price of « green » electricity) and incentive (improvement of the producers image) instruments. Did these instruments have a strong positive impact on the decision of the economic actors to invest in chemical recycling plants?*
- *Are these investments in other countries than France a proof that plastic waste chemical recycling is the "best" solution for recycling plastic waste being difficult to recycle mechanically?*
- *What new mechanism can be envisaged to ensure the development of an economically viable plastic waste chemical recycling industry in France? A system based on an ERP⁸ combined with the measurement of energy efficiency would be worth to be studied in priority. Such a system could apply, for example, to the gasification of RDF or some waste fractions from the post-sorting of automotive shredder residue.*

Assessment of the methodology

It seems relevant to make a critical review of the degree of confidence of the findings presented in this study. It has been mentioned several times in the report that strong attention must be paid to the fact that the information provided is not resulting from a consensus between the experts of the panel, but is rather a compilation of various opinions, each opinion dealing with one (or several) aspects specific to the expertise of each expert interviewed.

The methodology based on a panel of experts has many positive effects. Indeed, each opinion mentioned in this synthesis comes from an expert having a sharp knowledge in his field of expertise, strengthening the credibility of this

³ Il faut bien noter qu'il s'agit là de l'opinion des experts interrogés. A ce jour, aucune étude détaillée et exhaustive n'a été identifiée concernant les coûts de production du recyclage chimique.

⁴ La France fait beaucoup d'efforts, via l'ADEME, pour financer les projets de valorisation énergétique (BCIAT, AMI...), y compris ceux qui mettent en jeu d'autres entrants que la biomasse.

⁷ In France, many efforts have been done, with the assistance of the ADEME, to finance innovative energy recovery projects (BCIAT, AMI...), including technologies which are able to treat inputs other than biomass.

⁸ ERP : Extended Responsibility of the Producer.

- le fait que des industriels investissent dans ces pays signifie-t-il pour autant que le recyclage chimique est la solution optimale pour traiter ces déchets "difficiles" ?
- quel mécanisme pourrait permettre d'assurer la rentabilité économique d'une filière de recyclage chimique des déchets plastiques en France ? Parmi les pistes envisageables, celle qui consisterait à développer une filière basée sur une combinaison du principe de la REP et de l'efficacité énergétique mériterait d'être approfondie, par exemple pour la gazéification du CSR ou de certaines fractions issues du sur-tri des résidus de broyage automobile. La REP permettrait de contribuer au financement (ou à l'exploitation) des installations tandis que le critère de l'efficacité énergétique permettrait de s'assurer que la gazéification est bien le procédé le plus approprié par rapport au type de déchet concerné.

Regard critique sur la méthode utilisée

Il est utile de porter un regard critique sur le degré de confiance des résultats de cette étude. L'attention du lecteur a été attirée sur le fait que les avis d'experts présentés ne sont pas des avis consensuels. Il faut considérer ces informations comme une compilation de différents avis, chaque avis portant souvent sur des aspects spécifiques liés au domaine d'expertise de chaque expert interrogé.

L'approche "avis d'experts" comporte plusieurs aspects positifs. D'une part, chaque information provient de personnes ayant une expertise pointue dans leurs domaines respectifs, ce qui constitue un gage de crédibilité. D'autre part, la diversité des profils d'experts interrogés a permis de couvrir de façon exhaustive toutes les catégories de procédés de recyclage chimique. Enfin, on observe une bonne complémentarité entre l'approche "avis d'experts" et l'état des lieux réalisé en parallèle.

A contrario, l'étude a démontré un risque de biais important si une grande attention n'est pas portée à la représentativité du panel d'experts. Il faut absolument s'assurer de la diversité des profils en termes de métiers (chercheurs, concepteurs de procédés, exploitants d'unités industrielles), de pays et de types de procédés. Cela suppose un panel d'une taille suffisante, que nous estimons dans le cas présent à une douzaine d'experts.

En pratique, nous avons constaté que l'équilibre des profils est difficile à respecter. Dans un premier temps, même si le mode de constitution du panel intégrait clairement les critères de diversité et de complétude, nous avons sélectionné une proportion trop élevée d'experts spécialisés dans le recyclage chimique des déchets de composites par rapport à l'enjeu représenté par ces déchets en termes de tonnage. Cette imperfection du panel était due au fait que nous nous étions basés, pour effectuer la sélection des experts, sur les critères de disponibilité, de fréquence des publications et de degré d'ouverture à la discussion. Or il s'est avéré que les priorités en termes de couverture technologique ne peuvent pas se baser sur le nombre de publications. Dans un deuxième temps, nous avons remanié la composition du panel d'experts afin de tenir compte de ce facteur. L'enseignement que l'on peut en tirer est qu'il aurait été préférable de structurer le panel dès le début de l'étude sur la base des tonnages potentiels des différents gisements de déchets concernés.

D'autre part, une analyse de terrain avec rencontre d'exploitants de procédés "qui marchent" aurait certainement permis d'enrichir cette analyse en cernant mieux les conditions de rentabilité et les flux de déchets plastiques pouvant être traités sans problème majeur, technique ou de qualité.

information. Besides, the diversity of the profiles in the expert panel has led to a comprehensive coverage of the whole scope of chemical recycling processes. Eventually, we observe a good complementarity between the information of the expert panel and the state-of-the-art realized in parallel in the framework of this study.

Conversely, the study has underlined the importance of the representativeness of the expert panel, in order to avoid any risk of bias. It is essential to ensure a good diversity of the expert profiles, in terms of skills (searchers, process designers, plant operators...), countries and process categories. This supposes a panel being larger than a critical size that we estimate at twelve experts in the present case.

In practice, we have observed that it is not so easy to get a good balance between expert profiles. In the first period of the study, despite the stringent criteria of diversity established at the beginning, it appeared that the proportion of experts specialized in composites recycling was too high, compared with the stake represented by this type of waste in terms of tonnage. This unbalance was due to the fact that we selected the experts according to their availability, the frequency of their publications and their openness to exchange on the subject. We quickly discovered that the number of publications was not a relevant criteria. In a second step, we have adjusted the composition of the expert panel in order to extend the scope of the technologies and types of waste. We can conclude that it would have been more efficient to use the potential tonnage of each category of waste as the main criteria for the selection of the experts.

Moreover, it would have been pertinent to plan some "on site" visits providing the opportunity to meet the staff of "success stories", giving a better understanding of the conditions of economic competitiveness of plastic waste chemical recycling, as well as the types of waste which can be processed without major technical or quality problems.