

Recyclage chimique des déchets plastiques : Situation et perspectives

Etat de l'art et avis d'experts



C4H5O2_5 2/ 9/99 THERMC 4H 50 2 0G 300.000 5000.000/ 1392.000 1
1.64121890E+01 1.20184883E-02-4.40468566E-06 7.30124728E-10-4.42784365E-14 2

**RECYCLAGE CHIMIQUE DES DECHETS PLASTIQUES :
SITUATION ET PERSPECTIVES**

ÉTAT DE L'ART ET AVIS D'EXPERTS

RAPPORT FINAL

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

SOMMAIRE

<u>I. OBJECTIFS, METHODOLOGIE ET ORGANISATION DE L'ETUDE.....</u>	<u>5</u>
<u>II. PROCEDES DE GAZEIFICATION</u>	<u>9</u>
<u>III. PROCEDES DE PYROLYSE</u>	<u>21</u>
<u>IV. PROCEDES DE DEPOLYMERISATION</u>	<u>24</u>
<u>V. PROCEDES DE SOLVOLYSE.....</u>	<u>31</u>
<u>VI. PROCEDES DE DISSOLUTION</u>	<u>38</u>
<u>VII. SYNTHESE TRANSVERSALE DES AVIS D'EXPERTS</u>	<u>40</u>
<u>VIII. LE POINT DE VUE DES AUTEURS.....</u>	<u>46</u>
<u>IX. CONCLUSION</u>	<u>50</u>
<u>ANNEXE 1 : CHRONOLOGIE POSSIBLE DES ACTIONS</u>	<u>52</u>
<u>ANNEXE 2 : BIBLIOGRAPHIE.....</u>	<u>56</u>

Résumé

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 clés : 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.

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

I. Objectifs, méthodologie et organisation de l'étude

I.1 Objectifs de l'étude

On observe, en France et dans plusieurs autres pays de l'UE, une tendance au plafonnement du taux de recyclage mécanique pour certains gisements à fort contenu en déchets plastiques tels que les emballages et les DEEE. Les procédés de recyclage chimique constituent une piste à ne pas négliger 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 aujourd'hui mis en enfouissement¹.

Il y a donc nécessité de bien comprendre l'état réel de la situation du recyclage chimique des déchets plastiques sous ses aspects techniques et économiques au plan mondial ainsi qu'à identifier les pistes de développement les plus porteuses et les contraintes à surmonter.

Dans ce contexte, les objectifs de la présente étude sont les suivants :

- Etablir une revue de cadrage sur le 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 perspectives²
- 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 plastiques usagés, les freins et points de blocage de toutes natures, les points faisant consensus et les points de désaccord.

Cette étude permettra à RECORD de disposer d'un diagnostic de la situation et des perspectives, indispensable pour la définition ultérieure de priorités en matière de R&D.

I.2 Composition du comité de pilotage

Fabrice	ABRAHAM	RENAULT
Gérard	ANTONINI	UT COMPIEGNE / RECORD
Jean-Paul	CAZALETS	TOTAL
Lauro	CIMOLINO	SOCOTEC FRANCE
Bénédicte	COUFFIGNAL	RECORD
Bernard	DE CAEVEL*	RDC ENVIRONNEMENT
Christian	DELAVELLE*	AJI-EUROPE
Sylvain	DURECU	TREDI
Ralf Georg	EYSEN*	JAPAN CONSULT
François	HYVRARD	SARP INDUSTRIES - VEOLIA PROPRETE
Stefanie	KOHLER	TOTAL
Marie-Claire	MAGNIE	SITA RECYCLAGE
Carole	MARGOTIN	SUEZ ENVIRONNEMENT
Adeline	PILLET	ADEME
François	THERY	EDF

.* Auteurs de l'étude.

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

² L'état des lieux est réalisé par grandes catégories de procédés de recyclage chimique, en identifiant les références industrielles les plus significatives.

I.3 Champ de l'étude

Champ des procédés

Les procédés concernés couvrent le recyclage chimique au sens large. Outre les procédés basés sur des réactions en milieu « solvant », l'étude inclut également les procédés thermiques et catalytiques de craquage et de dépolymérisation, ainsi que les procédés de dissolution. Le principe de fonctionnement de chaque procédé est décrit au chapitre II.

Liste des procédés étudiés dans la cadre de l'étude

Gazéification
Pyrolyse lente
Dépolymérisation (pyrolyse rapide)
Solvolyse
Dissolution

D'autre part, l'expression « recyclage chimique » vise deux objectifs distincts en termes de « produits de réaction » : d'une part la voie « matière » consistant à revenir à des produits chimiques qui seront utilisables dans une étape ultérieure pour des synthèses ultérieures. D'autre part, la voie « énergétique » conduisant à la production de combustibles solides, liquides ou gazeux, y compris le « Waste to fuel » en vue de la production de carburants.

Champ géographique

Le champ de l'analyse est mondial.

I.4 Méthodologie

Nous avons procédé en trois phases :

Phase 1 : Préparation - Revue bibliographique de cadrage

- Constitution du groupe d'experts, en essayant de maximiser la diversité des profils en termes de métiers (chercheurs, concepteurs de procédés, exploitants d'unités industrielles), de pays et de types de procédés
- Revue bibliographique
- Préparation et diffusion aux experts d'un document de cadrage sur la situation et les tendances du recyclage chimique au plan international.

Phase 2 : Constitution et animation du groupe de travail

Un entretien individuel (ou deux selon les cas) a été mené avec chaque expert afin de faire remonter ses avis sur l'état de développement des procédés de recyclage chimique en France et dans le monde, sur les retours d'expériences, sur les technologies émergentes et sur les perspectives d'avenir. Nous avons restitué de façon anonyme les dires des experts interrogés de la façon la plus fidèle possible.

Phase 3 : Synthèse finale

Une fois préparée, la synthèse des avis a été soumise à chaque expert pour commentaires et suggestions. Le présent document intègre l'ensemble des résultats de l'analyse bibliographique et des contributions du groupe de travail. En complément, nous apportons également nos propres conclusions, en effectuant une mise en perspective des points qui nous semblent essentiels.

I.5 Composition du groupe d'experts

15 experts ont été interrogés :

Sébastien MASSON	MCR (Mixt Composites Recyclables – filiale de Plastic Omnium, France)
Eric LE GALL LA SALLE	ICAM Nantes (France)
Stefanie KOHLER	Total (France)
Cyril AYMONIER	Institut de Mécanique et d'Ingénierie de Bordeaux (France)
François COLLIGNON	Certech (Centre de recherche en Chimie) – Université de Louvain – (Belgique)
Martin SCHLUMMER	Fraunhofer – IVV – (Allemagne)
Marie-Hélène LABRIE	Première vice-présidente - Enerkem (Canada)
T. YAMAWAKI	Japan Society of Material Cycles and Waste Management Ancien expert du PWMI (Plastic Waste Management Institute, Japon)
Alfons BUEKENS	Université de Shanghai (ancien professeur à l'Université de Bruxelles)
Pierre-François BAREEL	Directeur de la recherche (Belgique) - Comet Traitement
Philippe HUYBRECHTS	Total (Belgique)
Philippe THIBAUT	Design & Technology Manager (Belgique) - TPF – Basse Sambre
Pascal COLLIGNON	PDG de Finaxo environnement (France)
Olivier CEYSSON	Directeur de la R&D – Gerflor (France)
Jean-Jacques ROBIN	Chercheur à l'Université de Montpellier (France)

Attention !

Les avis présentés dans cette étude ne sont pas des avis consensuels. Il s'agit d'une compilation de différents avis. Chaque avis porte souvent sur des aspects spécifiques car chaque expert a des domaines spécifiques de spécialité.

De même, les auteurs rapportent ces avis dans la première partie du présent document (jusqu'au chapitre VII), sans forcément les partager. Ils donnent leur avis au chapitre VIII.

Le Comité de Pilotage ne partage pas nécessairement les idées exprimées dans le présent document.

II. Procédés de gazéification

II.1 Etat de l'art

1- Description des procédés / conditions opératoires

La gazéification est un processus thermique effectué en présence d'une quantité réduite d'oxygène, dans une plage de température généralement supérieure à 800°C, qui permet de traiter des déchets contenant une fraction combustible (1).

La pyrogazéification³ opère à température élevée (phase de pyrolyse dans la plage 800 - 1000°C) ce qui présente l'avantage de conduire à des taux de goudrons très faibles dans le gaz de synthèse. Après refroidissement et lavage, les goudrons résiduels sont éliminés par passage sur charbons actifs ou par dissolution.

La technologie du lit fluidisé est souvent utilisée. Les déchets sont entrés dans un lit de sable de silice fluidisé dans un courant d'air chaud. La technologie du lit fixe n'est pas adaptée.

2- Types de déchets plastiques pouvant être traités

La gazéification permet de traiter tous les types de polymères.

Elle est capable de traiter des déchets souillés et en mélange. Toutefois, il est préférable que la charge soit débarrassée au maximum de son contenu en métaux et en fermentescibles (2).

3- Stade de développement et références

Références industrielles identifiées :

Les points ci-après décrivent succinctement les principales caractéristiques qualitatives et quantitatives de chaque installation de gazéification de déchets plastiques (ou de déchets contenant des plastiques) identifiée. Le lecteur trouvera à la fin du point 3 un tableau récapitulatif des principales caractéristiques de ces installations.

Showa Denko K.K (Kawasaki Works - Japon): Gazéification pour synthèse de l'ammoniac, à partir d'emballages ménagers (bouteilles et flacons). Capacité:195t/jour. L'installation est subventionnée. Il n'est pas certain qu'elle fonctionne encore.



³ Le coke produit est brûlé pour fournir l'apport thermique nécessaire à la pyrolyse.

Sur procédé Alter-NRG : Plusieurs unités de gazéification équipées des torches à plasma. Production de chaleur + électricité à partir du gaz de synthèse :

- une unité en démarrage en Chine sur déchets ménagers (30 t/jour) + une unité en construction
- une unité en prédémarrage à Tees Valley (Grande-Bretagne) + une unité en construction (950 t/jour) également à Tees Valley.

Sur procédé Enerkem (Canada) : une unité de gazéification en lit fluidisé + synthèse aval d'éthanol carburant, située à Edmonton (Alberta). Démarrée en juin 2014. Le procédé fournit un gaz de synthèse qui est ensuite transformé en méthanol par synthèse catalytique, puis repris par décarbonylation et déshydrogénation et transformé en éthanol carburant. Un contrat sur 5 ans a été passé avec la municipalité d'Edmonton pour utiliser environ 100 kt/an de CSR. Les OMR font l'objet d'un tri des putrescibles, d'un déchetage et d'une séparation des métaux. Une unité similaire est en projet à Varennes (Montréal), à partir de déchets de bois, de RBA et de plastiques commerciaux.



Sur procédé Nippon Steel : unité exploitée par Nippon Steel et Sumitomo Metal Corporation (Japon) pour le traitement de RBA. Capacité : 120 t/jour en une ligne. Mise en service en 2006. Utilisée pour fournir de la vapeur à l'usine.

Pour mémoire, l'unité de 320 t/jour fonctionnant également sur **procédé Nippon Steel** et exploitée depuis 2005 par Kita-kyushu Eco Energy Co. Ltd. à Fukuoka a été arrêtée récemment. La raison de cet arrêt n'est pas connue. Elle utilisait du RBA et des déchets ménagers et produisait de la vapeur et de l'électricité.

Sur **procédé Valmet**, une unité de gazéification située à Lahti (Finlande), démarrée en 2011, utilisant du CSR issu de déchets ménagers et industriels (PCI moyen : 24 MJ/kg sur déchet sec). Aux dires de l'exploitant, c'est la plus grosse usine de gazéification dans le monde fonctionnant avec du CSR. Production d'électricité (50 MWe) et de chaleur (90 MW). Investissement : 160 M€. En septembre 2014, le temps d'exploitation atteignait 16000 heures cumulées. Selon le constructeur, les performances prévues ont été atteintes (capacité, fiabilité, absence de corrosion) mais des ajustements sont en cours pour optimiser le fonctionnement.

Une unité de gazéification fonctionnant sur **procédé EcoLoop**, basée à Goslar (Allemagne), d'une capacité de 40000 t/an de déchets (pour une production électrique de 32 MW), en activité depuis 2012. L'installation traite des déchets plastiques et du CSR. Ce procédé présente la particularité de pouvoir traiter des déchets riches en PVC. Le gaz de synthèse est utilisé pour la fabrication de chaux et de chlorure de calcium. Cette unité s'apparente à un démonstrateur.

Une unité de pyrogazéification fonctionnant sur le **procédé PIT-Pyroflam**, située à Reykjavik

(Islande). Mise en service en 2004, cette unité traite des ordures ménagères, des déchets industriels, des déchets hospitaliers, des peintures.... Capacité: 1,6 t/h. Production d'électricité et de chaleur.

Une unité de pyrogazéification de 0,25 t/h sur **procédé Pyrobio** (Finaxo) est en cours de démarrage (janvier 2015) sur le site de Bergame de la société Italcanditi, leader européen de la pâte de fruits et des marrons glacés. L'unité est conçue pour traiter des boues de STEP pendant 8 mois/an (en temps cumulé) et des déchets d'emballages plastiques pendant les 4 mois restants.

Au Japon, en 2007, 15 unités étaient en fonctionnement (29 lignes) sur **procédé Ebara-TwinRec**, pour une capacité cumulée de traitement de 2 700 tonnes/jour (soit environ 850 000 t/an), majoritairement des déchets ménagers. Une autre source indique qu'en 2009, 12 unités étaient en fonctionnement (21 lignes) pour une capacité cumulée de traitement de 3 100 tonnes/jour (soit environ un million de t/an).

En Europe, les sociétés japonaises Ebara, JFE, Nippon Steel et Kobelco ont beaucoup prospecté pour essayer de s'implanter sur le marché, mais avec peu de résultats concrets pour le moment. Une unité basée sur le procédé JFE serait en construction en Italie (Rome) depuis plusieurs années mais sa réalisation se heurte à des problèmes contractuels.

Unités industrielles de gazéification de déchets plastiques (ou de déchets contenant des plastiques)
(cette liste récapitule les unités identifiées dans le cadre de l'étude. Elle ne prétend pas à l'exhaustivité)

Pays / localisation	Opérateur	Procédé	Technologie (réacteur)	Types de déchets traités	Capacité	Procédé (1^{ère} vs. 2^{ème} génération)	Année de démarrage	Produits de sortie	Commentaires
Japon	Kawasaki Works	Showa Denko K.K	n.s	Emballages ménagers (bouteilles et flacons)	195t/jour	n.s	n.s	Ammoniac	Il n'est pas certain que l'unité fonctionne encore
Chine	n.s	Alter-NRG	Lit fixe contre courant + torches à plasma	Déchets ménagers	30 t/jour	n.s	En démarrage	Gaz combustible	Une autre unité est en construction
Grande-Bretagne / Tees Valley	Air Products	Alter-NRG	Lit fixe contre courant + torches à plasma	Déchets ménagers	950 t/jour	1 ^{ère} génération	En pré-démarrage	Gaz combustible	Problème de disponibilité des déchets. Une autre unité est en construction
Canada / Edmonton (Alberta).	n.s	Enerkem	Lit fluidisé	CSR	environ 300 t/jour	n.s	Juin 2014	Ethanol carburant	Unité similaire en projet à Varennes (Montréal), à partir de déchets de bois, de RBA et de plastiques commerciaux
Japon	Nippon Steel et Sumitomo Metal Corp.	Nippon Steel	Lit fixe à co-courant	CSR	120 t/jour	1 ^{ère} génération	2006	Vapeur	
Japon / Fukuoka	Kita-kyushu Eco Energy Co. Ltd.	Nippon Steel	n.s	RBA et déchets ménagers	320 t/jour	1 ^{ère} génération	2005	Vapeur et électricité	Unité arrêtée récemment
Finlande (Lahti)	n.s	Valmet	Lit fluidisé circulant	CSR	n.s	1 ^{ère} génération	2011	Electricité (50 MWe) et chaleur (90 MW)	
Allemagne (Goslar)	n.s	Ecoloop	Lit circulant à contre-courant	Déchets plastiques et CSR	125 t/jour	1 ^{ère} génération	2012	Electricité (32 MWe) + chaux et	Démonstrateur. Peut traiter des déchets riches

								chlorure de calcium	en PVC
Islande (Reykjavik)	n.s	PIT-PYROFLAM	n.s	Ordures ménagères, déchets industriels, déchets hospitaliers, peintures...	38 t/jour	1 ^{ère} génération	2004	Electricité et chaleur	
Italie (Bergame)	Italcanditi,	Pyrobio (Finaxo)	n.s	Boues de STEP (2/3 du temps) et déchets d'emballages plastiques (1/3 du temps)	6 t/jour	1 ^{ère} génération	2015	En cours de démarrage	
Japon (Aomori)	n.s	Ebara-TwinRec	Lit fluidisé	RBA, boues de STEP	2 x 225 t/jour	1 ^{ère} génération	2000	Chaleur + électricité	
Japon (Joetsu)	n.s	Ebara-TwinRec	Lit fluidisé	Plastiques, boues de STEP	15,7 t/jour	1 ^{ère} génération	2000	Chaleur + électricité	
Japon (Kurobe)	n.s	Ebara-TwinRec	Lit fluidisé	RBA, plastiques, déchets industriels	63 t/jour	n.s	2000	Combustible	
Japon (Sakata)	n.s	Ebara-TwinRec	Lit fluidisé	Déchets ménagers	2 x 98 t/jour	1 ^{ère} génération	2002	Chaleur + électricité	
Japon (Kawaguchi)	n.s	Ebara-TwinRec	Lit fluidisé	Déchets ménagers	3 x 140 t/jour	1 ^{ère} génération	2002	Chaleur + électricité	
Japon (Ube city)	n.s	Ebara-TwinRec	Lit fluidisé	Déchets ménagers	3 x 66 t/jour	1 ^{ère} génération	2002	Chaleur + électricité	
Japon (Seki)	n.s	Ebara-TwinRec	Lit fluidisé	Déchets ménagers	3 x 56 t/jour	1 ^{ère} génération	2003	Chaleur + électricité	
Japon (Lida)	n.s	Ebara-TwinRec	Lit fluidisé	Déchets ménagers	2 x 46,5 t/jour	1 ^{ère} génération	2003	Chaleur + électricité	
Japon (Nagareyama)	n.s	Ebara-TwinRec	Lit fluidisé	Déchets ménagers	3 x 69 t/jour	1 ^{ère} génération	2004	Chaleur + électricité	
Japon (Tokyo Rinki)	n.s	Ebara-TwinRec	Lit fluidisé	Déchets industriels	2 x 275 t/jour	1 ^{ère} génération	2006	Chaleur + électricité	
Japon (Hino City)	n.s	Ebara-TwinRec	Lit fluidisé	Déchets ménagers	3 x 60 t/jour	1 ^{ère} génération	2007	Chaleur + électricité	

Nota : Les capacités mentionnées dans le tableau ci-dessus sont volontairement indiquées en t/jour de déchets traités. C'est en effet cette unité qui est la plus souvent utilisée dans les publications et dans les communications des sociétés. Il nous a semblé préférable d'utiliser des t/jour plutôt que des t/an dans la mesure où il n'est pas certain que toutes ces unités soient conçues pour un fonctionnement de 320 jours/an. A titre indicatif, pour un fonctionnement de 320 jours/an, la conversion des t/jour en kt/an pour quelques capacités de référence est la suivante :

t/jour	kt/an
5	1,6
10	3,2
20	6,4
50	16
100	32
200	64
300	96

4- Nature des produits de sortie

La gazéification génère (1) :

- un gaz de synthèse constitué majoritairement d'un mélange CO + H₂, dont le PCI peut varier entre 700 et 2200 kcal/kg selon qu'il s'agit d'une gazéification à l'air ou à l'oxygène. Fréquemment, du fait des teneurs élevées en impuretés (goudrons, chlore, soufre...) la qualité du gaz de synthèse produit n'autorise qu'un usage comme combustible pour des équipements industriels (chaudières, moteurs à gaz) ou encore comme combustible dans des cimenteries ou autres gros consommateurs d'énergie. Les rendements énergétiques annoncés par les concepteurs de procédés sont compris dans une très large fourchette de 37 à 90%. Une majorité se situe entre 60 et 80%. Ces différences de rendements doivent être interprétées avec beaucoup de prudence, les méthodes de détermination pouvant être radicalement différentes d'un procédé à l'autre (un rendement électrique ne peut pas être comparé à un rendement thermique ou thermochimique et les informations disponibles ne permettent pas toujours d'établir clairement la nature du rendement revendiqué par un concepteur de procédé). La plus grande prudence est donc de mise dès lors qu'il est question de rendement. D'autre part, le rendement matière diminue lorsque la contamination du déchet traité augmente.
- un sous-produit solide constitué de la fraction non combustible du déchet traité, contenant une faible quantité de carbone.

5- Post-traitements possibles

Le réformage catalytique permet de transformer le gaz de synthèse en ammoniac, éthanol ou méthanol. Ce type de procédé est mature au plan industriel.

Les goudrons contenus dans le gaz de synthèse peuvent être éliminés soit par craquage thermique (par exemple dans une torche à plasma) soit par craquage catalytique, soit par lavage (16). Le gaz ainsi épuré des goudrons peut être utilisé plus facilement pour produire de l'électricité dans une turbine à gaz ou pour d'autres valorisations énergétiques ou chimiques.

Après séparation des métaux, le sous-produit solide est susceptible d'être valorisé, sous certaines conditions, de manière analogue à un mâchefer d'incinération (sous réserve que la teneur en carbone organique total soit inférieure à la valeur limite de la réglementation, ce qui peut être d'autant plus difficile à respecter que le déchet de départ a une fraction incombustible faible), ou d'être vitrifié avant valorisation. Le principal sous-produit de la gazéification avec torche à plasma est un résidu vitrifié solide, en principe inerte, pouvant être réutilisé, entre autres, dans la construction de routes.

II.2 L'opinion des experts

II.2.1. Quelles sont les raisons des échecs rencontrés par les procédés de gazéification de déchets plastiques dans le passé ?

Le développement industriel des procédés de gazéification se heurte à de nombreux problèmes :

- Des problèmes de qualité des charges, principalement :
 - o la présence de chlore, qui provoque une corrosion prématurée des équipements
 - o la présence de silicones, qui se transforment en siloxanes puis en sable au cours du processus réactionnel, ce qui abîme les moteurs
 - o l'hétérogénéité des déchets et leur pouvoir abrasif (présence de petits morceaux ou poussières de verre, de céramique, de métal), qui provoque une usure prématurée des parois des équipements et des tuyauteries. Il en résulte des arrêts maintenance prolongés, fortement préjudiciables au plan économique. La situation s'est toutefois améliorée depuis quelques années avec l'amélioration des technologies de tri du verre et des inertes dans les déchets.
- Des problèmes d'approvisionnements en déchets : l'erreur des industriels a été pendant longtemps de miser sur des capacités élevées alors que la disponibilité en déchets n'était pas assurée. Par exemple, l'unité projetée au début des années 2000 par BASF, d'une capacité de 300 à 600 kt/an, devait fonctionner avec des déchets fournis par DSD. Elle n'a jamais vu le jour car BASF voulait une garantie d'approvisionnement et DSD n'a pas accepté de s'engager dans la durée.
- Des contraintes réglementaires : il existe un flou sur la définition du recyclage chimique. Selon la Commission européenne, il y a recyclage chimique si, et seulement si l'usage du produit final est « chimique » (par exemple l'utilisation du gaz de synthèse dans un vapocraqueur pour fabriquer de l'éthylène). A contrario, si l'utilisation finale du produit fabriqué est énergétique (par exemple la fabrication de gazole carburant au moyen d'un craquage catalytique), le procédé n'est pas considéré comme du recyclage chimique. Cette incongruité relative aux applications « carburants » dissuade les industriels et les élus des collectivités qui souhaiteraient investir en ayant un support financier des organismes en charge d'assurer l'atteinte des taux de recyclage légaux.

Au plan de la réglementation française, la gazéification est considérée comme de la co-incinération. Une autorisation est nécessaire dès la première tonne de déchet traitée. En Italie, un industriel n'est dans l'obligation de déclarer qu'au-delà d'un seuil de 5 MW en entrée. Au Canada, la législation relative aux installations de « production de gaz » accorde facilement des autorisations d'exploitation jusqu'à 10MW (cf. contrat récent de la société Finaxo avec Hydro-Québec pour le traitement de bois créozoté).
- Des problèmes liés à la qualité des produits sortants. Les industriels sont confrontés au problème récurrent des teneurs élevées en goudrons dans les produits de réaction et de particules dans le gaz de synthèse. Les traitements avals nécessaires génèrent des surcoûts importants. L'intensité de ce facteur est variable selon les technologies utilisées (les procédés de deuxième génération permettent de réduire fortement les teneurs en goudrons, de même que les technologies utilisant des réacteurs à lit fluidisé)
- Des problèmes économiques : Certains procédés ont connu des difficultés du fait de la forte sous-estimation des coûts d'investissement. On notera en particulier la difficulté d'extrapoler quand on passe de l'échelle pilote à l'échelle industrielle, et encore plus quand on passe d'essais avec des flux assez purs pendant une durée limitée à des flux réels sur une longue durée. Compte tenu de la situation du marché des déchets en amont (prix supérieurs offerts par les recycleurs mécaniques) et en aval (prix inférieurs des procédés de traitement traditionnels comme l'incinération directe et la

mise en décharge) et du faible niveau des prix de rachat de l'électricité, les procédés de gazéification ne sont pas rentables⁴.

- Des problèmes de communication : Aux yeux de nombreux élus locaux et décideurs publics, le recyclage chimique est perçu comme une voie « concurrente » du recyclage mécanique, susceptible de supprimer des emplois existants.
- Les problèmes de conception de certaines installations : Par exemple, l'usine Arthélyse d'Arras, construite et exploitée par Thide Environnement pour le compte du Syndicat Mixte Artois Valorisation et fermée en 2009 a été pénalisée dès le départ par un sérieux problème d'implantation. La liaison en sortie du réacteur était en effet trop longue, provoquant des problèmes de colmatage des tuyauteries par condensation des goudrons et dépôt de carbone pulvérulent, et entraînant de fréquents arrêts de l'installation.

II.2.2. Quels gisements de déchets plastiques sont valorisables par gazéification ?

Le degré d'adéquation entre le type de déchets à traiter et la technologie de gazéification utilisée dépend de trois facteurs : la « génération » du procédé (première vs. deuxième génération), la technologie du réacteur et le caractère plus ou moins biosourcé ou pétrosourcé du déchet.

Procédés de première vs. deuxième génération

Les procédés de première génération se sont développés dès le début des années 80 et la technologie est aujourd'hui mature. Le gaz de synthèse est systématiquement brûlé à l'intérieur du procédé, afin de produire de la chaleur, une partie pouvant être convertie en électricité. Ces procédés sont fréquemment utilisés dans le monde (pour le traitement de biomasse, de charbon), mais relativement peu pour traiter des déchets plastiques. Ils sont capables de traiter des déchets en mélange et/ou contaminés, en particulier des ordures ménagères. Deux exemples : l'unité de 12kt/an de déchets ménagers bruts exploitée en Islande sur procédé PIT-Pyroflam et l'unité de gazéification de déchets plastiques municipaux en cours de prédémarrage en Grande-Bretagne sur procédé Alter NRG.

Les procédés de deuxième génération sont plus récents et leur taux d'industrialisation est très faible (on en est aujourd'hui au stade des démonstrateurs). Ils constituent une évolution technique en profondeur dans la mesure où ils sont conçus pour produire du gaz de synthèse pouvant être utilisé comme combustible, comme produit intermédiaire en vue de la synthèse de carburants ou comme produit intermédiaire pour la synthèse ultérieure de nouveaux produits chimiques. L'étape d'épuration des goudrons et poussières prend toute son importance, afin que le gaz de synthèse obtenu respecte les critères de pureté requis. Ces procédés de deuxième génération sont conçus pour traiter des charges plus homogènes, par exemple des CSR ou du RBA.

Technologie du réacteur

Les réacteurs à lit fluidisé sont bien adaptés à la gazéification des déchets plastiques car ils procurent une grande surface spécifique, permettent des temps de séjour courts et acceptent des déchets de faible densité. Leurs exigences en matière de granulométrie sont fortes (moins de 10 mm)

Les réacteurs à lit entraîné (recirculation de la charge liquide ou en poudre fine) sont intéressants car les « slags » forment une couche protectrice sur les parois du réacteur, ce qui permet de réduire l'épaisseur du réfractaire, d'où un investissement moindre et moins de problèmes en cas d'arrêt pour maintenance. Par contre, les exigences en matière de granulométrie sont très fortes.

⁴ En Grande-Bretagne, Alter NRG a obtenu des subventions « ROC » (Renewables Obligation Certificates). Pour chaque MWh d'électricité d'origine renouvelable produite, le producteur peut ensuite vendre ces ROC et bénéficier d'une prime sur le prix de l'électricité vendue.

Les réacteurs à lit fixe, bien qu'ils permettent de traiter des déchets peu préparés, ne sont pas appropriés au traitement des déchets plastiques car le PCI élevé de la charge se traduit par des températures opératoires élevées, ce qui conduit à des fusions, collages et enrochages nombreux. Pour remédier à cela, il est nécessaire d'injecter de l'air pour refroidir, provoquant une forte augmentation du volume des fumées, avec des conséquences négatives en termes de coût d'investissement et de coût de post-traitement des fumées.

Déchets biosourcés vs. déchets pétrosourcés

L'intérêt de la gazéification est variable selon que le déchet est constitué d'un mélange de déchets majoritairement « biosourcés » ou « pétrosourcés ». La gazéification est bien adaptée aux déchets constitués de mélanges de plastiques et de déchets biosourcés (cartons, papiers, bois, textiles...) ⁵.

Au contraire, si on est en présence de déchets « pétrosourcés » constitués principalement de plastiques thermofusibles, la pyrolyse rapide est plus appropriée que la gazéification car elle produit beaucoup d'hydrocarbures à PCI élevé ayant les caractéristiques d'un carburant liquide stockable.

Loin de constituer un obstacle, la présence de déchets biosourcés dans les déchets à traiter est donc au contraire favorable à la gazéification. De ce fait, le CSR issu du tri des recyclables légers de la collecte sélective des ordures ménagères constitue un gisement intéressant pour la gazéification, car il est riche en composés biosourcés. La disparition progressive des décharges (seuls les déchets ayant un taux de carbone <5% sont acceptés) et les objectifs réglementaires de plus en plus élevés de valorisation des déchets sont également des facteurs favorables au développement du traitement du CSR par gazéification.

II.2.3. Quels débouchés faut-il privilégier pour les produits de réaction ?

La voie la plus porteuse pour le gaz de synthèse est la voie « énergétique », c'est-à-dire la production d'électricité et de chaleur au moyen d'une unité de cogénération. Dans la plupart des cas, le rendement de la voie énergétique, meilleur que celui d'un ensemble incinération/chaudière/turbine à vapeur, est un atout important ⁶.

La voie « chimique » (gazéification / bases chimiques / synthèse) est moins compétitive que la voie « énergétique » car les produits issus de la gazéification sont en concurrence frontale avec les bases pétrochimiques issues du pétrole et du gaz naturel, qui bénéficient d'importantes économies d'échelle et donc de coûts de production faibles.

La fabrication de carburant automobile diesel par synthèse Fischer et Tropsch à partir du gaz de synthèse n'est pas envisageable dans l'état actuel des technologies. D'une part les exigences de pureté du gaz de synthèse destiné à alimenter ce type d'unité sont très fortes car il s'agit d'un procédé catalytique. En outre, le procédé étant complexe, cette voie n'est envisageable qu'avec des unités de grande capacité (200 à 300 kt/an) capables de produire des tonnages suffisants pour amortir les investissements très élevés. La disponibilité d'un tel volume de déchets à un coût acceptable n'est pas concevable en France.

La combustion en cimenterie du gaz de synthèse issu du CSR est préconisée par certains cimentiers qui estiment que le taux de substitution en tuyère principale des cimenteries a atteint sa limite (CSR, pneus usagés, huiles usagées...).

⁵ A contrario, les produits de réaction issus de la pyrolyse rapide de ces déchets (cf. chapitre IV) sont pénalisés par leur contenu élevé en carbone fixe, eau, phénols et acide acétique.

⁶ Ce n'est pas systématiquement le cas. Pour certains procédés de gazéification ou certains types de déchets, le rendement énergétique de la gazéification est plus faible que celui de la combinaison incinérateur/cogénération.

II.2.4. Quelle est la plage de capacité optimale ?

Les unités de gazéification de grande capacité (supérieures à 100 kt/an de déchets traités) sont pénalisées par des surcoûts prohibitifs en cas d'arrêts non programmés, par des difficultés d'obtention de permis de construire et par les contraintes d'approvisionnement en déchets.

Il est donc préférable de faire primer la fiabilité et la sécurité de fonctionnement sur le facteur « économie d'échelle », avec des unités de gazéification d'une capacité comprise entre 10 et 50 kt/an de déchets traités. La taille du gisement de déchets captable dans des conditions économiques acceptables, elle-même fortement dépendante de chaque contexte local et du type de déchet concerné, constitue par conséquent un facteur clé de choix de la capacité.

Dans le cas d'unités dont la capacité est située dans le haut de la fourchette, la conception modulaire est fortement recommandée (par exemple deux modules de 20 MW chacun au lieu d'un seul module de 40 MW) car elle autorise une meilleure flexibilité et une gestion optimisée de la maintenance et de l'exploitation. Ainsi, si une partie de la chaleur est destinée à alimenter du chauffage urbain, cela permet d'arrêter l'un des modules en été lorsque la demande est faible.

II.3 Synthèse

Nous avons recensé une vingtaine d'unités industrielles de gazéification opérationnelles ou en démarrage dans le monde (l'existence de certaines d'entre elles étant sujette à caution) fonctionnant sur des déchets plastiques, ainsi que 3 ou 4 unités en construction. Elles sont toutes basées sur des procédés de première génération.

Pour le traitement des déchets en mélange (dont les ordures ménagères), les technologies utilisées le plus fréquemment sont le lit entraîné et le lit fluidisé. Pour le traitement du CSR et du RBA, il s'agit en majorité de lits fixes co-courant, de lits circulants à contre-courant et de lits fluidisés circulant⁷.

Le Japon est le pays où le nombre de références industrielles est le plus élevé. Des unités industrielles, pour la plupart très récentes, fonctionnent également en Finlande, au Canada, en Italie et en Allemagne. Le nombre élevé d'unités au Japon (12 unités identifiées rien que sur le procédé Ebara-TwinRec) est dû au contexte très favorable à la gazéification qui a prévalu pendant les années 2000, pour deux raisons principales : des standards très stricts en matière d'émission de dioxines (à l'époque, cela freinait la construction de nouveaux incinérateurs) et des coûts de mise en décharge extrêmement élevés. De ce fait, les exploitants n'étaient pas trop regardants sur les coûts d'exploitation. De leur côté les unités de la société JFE Engineering exploitées au Japon depuis 2003 fonctionnent sur des OMR, du CSR et du RBA. Aujourd'hui le contexte a changé. Des coopérations se sont développées entre les collectivités locales pour investir dans des incinérateurs performants. En outre, les collectivités sont plus attentives aux coûts d'exploitation.

Pour les installations de 2^{ème} génération, l'utilisation la moins coûteuse en termes d'investissement est la production d'électricité et de chaleur à partir du gaz de synthèse dans des unités de cogénération (sous réserve que la teneur en goudron du gaz de synthèse ne soit pas trop élevée).

Dans ce cas, la combustion du gaz de synthèse issu du CSR en cimenterie ou dans des fours à chaux est également une piste intéressante.

Il est préférable d'opter pour des unités de gazéification de capacité faible / moyenne (10 à 50 kt/an de déchets traités), quitte à installer plusieurs réacteurs en parallèle. La taille du gisement de déchets captable dans de bonnes conditions de prix constitue un facteur clé de choix de la capacité.

⁷ Il s'agit là de tendances observées, sachant que pour certaines installations identifiées la technologie utilisée n'est pas connue.

Les aspects sécurité sont plus importants dans le cadre de la gazéification que pour d'autres procédés thermiques.

Les coûts d'investissements élevés, la rigidité du cadre réglementaire en matière d'autorisations d'exploitation et la difficulté de trouver des gisements de déchets stables, réguliers et d'une qualité suffisante à un coût acceptable rendent très aléatoires les perspectives de développement de la gazéification des déchets plastiques en France.

III. Procédés de pyrolyse

III.1 Etat de l'art

Remarque préliminaire :

Cette fiche concerne les procédés de pyrolyse lente (c'est-à-dire à faible gradient de température au niveau de la particule à traiter). Les procédés de pyrolyse rapide (pyrolyse flash, avec gradient de température élevé) sont traités au chapitre suivant « Dépolymérisation ».

1- Description des procédés / conditions opératoires

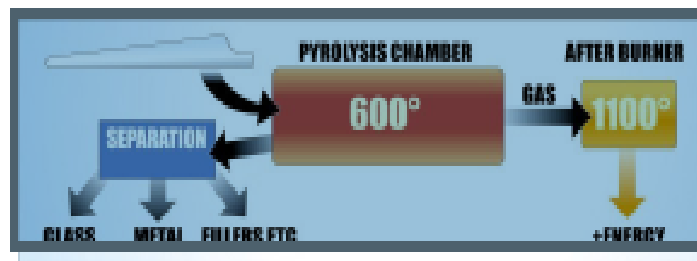
La pyrolyse est un processus thermique dans la plage de 350 à 800°C qui permet de traiter des déchets en l'absence d'oxygène. Dans la pratique, l'énergie nécessaire aux réactions de pyrolyse est parfois obtenue par des réactions exothermiques d'oxydation partielle, produite par une injection limitée d'air ou d'oxygène.

Plusieurs variantes ont été développées : pyrolyse catalytique basse température (environ 200°C), pyrolyse sous vide (environ 500°C) et pyrolyse micro-ondes.

2- Types de déchets traités

Les déchets de composites à base de fibres de carbone et de fibre de verre (4) font l'objet d'une décomposition thermique lente en l'absence d'oxygène. La température est généralement comprise entre 450 et 700°C (ReFiber Aps (Danemark) effectue une pyrolyse à 600°C)⁸.

Schéma de principe du procédé ReFiber Aps



3- Stade de développement et références

La pyrolyse des déchets de composites fibres de carbone/époxy est largement développée dans le monde (5).

Exemples de sociétés exploitant des unités de pyrolyse lente de déchets de composites :

- ELG Carbon Fibre Ltd (GB) fait partie du groupe ELG Haniel GmbH depuis 2011. Cette société revendique la mise en service en service en 2009 dans les Midlands la première unité (au niveau mondial) de recyclage de fibres de carbone par pyrolyse lente à l'échelle industrielle. Capacité de traitement : 2000 t/an de composites usagés en carbone / époxy.

⁸ La pyrolyse lente est capable de traiter d'autres types de déchets de polymères, mais les perspectives de développement industriel sont peu favorables.

- Materials Innovation Technologies (USA). Cette société exploite en Caroline du sud une unité industrielle de recyclage de fibres de carbone par pyrolyse lente à l'échelle industrielle. Capacité de traitement : 1500 à 3000 t/an de composites fibre de carbone / époxy, principalement des déchets de production.
- CFK Valley Stade Recycling GmbH & Co (All.). Cette société exploite depuis 2010 à Wischhafen une unité industrielle de recyclage de fibres de carbone par pyrolyse lente à l'échelle industrielle. Capacité de traitement : 1500 t/an de composites usagés fibre de carbone / époxy.
- Hadeq Recycling GmbH recycle des composites fibres de carbone/époxy depuis 1995 (les données relatives à la capacité de l'unité de production sont confidentielles).
- Karborek S.p.a. (Italie) exploite une unité industrielle à Puglia (province de Lecce) d'une capacité de traitement de 1500 t/an de composites fibre de carbone/époxy.
- ReFiber Aps (Danemark) exploite une unité mais les informations sont confidentielles. Pour mémoire, ReFiber Aps a investi il y a quelques années dans une installation de recyclage par pyrolyse lente des déchets de fabrication de pales d'éoliennes en fibre de verre/polyester, d'une capacité de traitement de 5000 t/an de composites usagés. Cette unité a cessé son activité et les déchets sont aujourd'hui mis en décharge.
- Adherent Technologies Inc. (USA) a développé (5) un pilote de pyrolyse sous vide et de pyrolyse catalytique à basse température, d'une capacité de 23kg/h.

4- Nature des produits de sortie

Trois fractions sont produites (5):

- Une fraction gazeuse composée principalement d'hydrogène, de méthane et d'hydrocarbures divers en faible proportion
- Une huile
- Une fraction solide contenant un mélange de composés organiques + les fibres recyclées.

Les propriétés mécaniques des fibres de carbone recyclées sont dégradées par rapport aux fibres vierges (perte de 4% à 50% sur la tension de rupture à l'élongation selon la température). La température opératoire a un impact déterminant sur les propriétés mécaniques, électriques et de surface des fibres recyclées. Elle doit être ajustée en fonction du déchet traité.

III.2 Opinion des experts

III.2.1. Quels gisements de déchets sont valorisables par pyrolyse ?

Les procédés de pyrolyse lente n'acceptent pas les déchets de polymères en mélange. Un tri préalable des déchets de composites est donc nécessaire.

III.2.2. Quelles sont les technologies à privilégier ?

Les technologies de pyrolyse catalytique à basse température (environ 200°C) et de pyrolyse micro-ondes conduisent à des fibres recyclées propres et ayant de bonnes caractéristiques mécaniques et de surface. Ces technologies n'ont pas atteint le stade industriel.

A contrario, la pyrolyse sous vide conduit à des fibres dont les performances sont moindres du fait de la présence de goudrons à la surface des fibres. Un post-traitement est nécessaire.

III.3 Synthèse

La pyrolyse des déchets de matériaux composites époxy/fibre de carbone est largement développée dans le monde, mais les recycleurs français sont absents de ce marché. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que les fibres obtenues par pyrolyse des composites ont des performances inférieures à celles des fibres neuves.

Les technologies innovantes de pyrolyse catalytique à basse température et de pyrolyse micro-ondes sont prometteuses.

L'enjeu économique du gisement de déchets de composites fibres de carbone/époxy va croître au fur et à mesure de l'augmentation des quantités de déchets de composites (déchets de production et déchets de produits en fin de vie), en particulier dans le secteur de la construction aéronautique.

IV. Procédés de dépolymérisation

IV.1 Etat de l'art

1- Description des procédés / conditions opératoires

Deux catégories de procédés peuvent être distinguées :

Les procédés de **dépolymérisation thermique avec retour aux monomères** (1, 6), qui permettent de transformer des polymères (plastiques, élastomères) en monomères ou en oligomères par apport de chaleur, sans qu'un réactif chimique n'intervienne dans les réactions de coupure des chaînes. Les déchets sont chauffés progressivement jusqu'à environ 400 - 450 °C. Après repolymérisation dans une étape ultérieure, les produits obtenus ont des caractéristiques et des performances plus proches des plastiques vierges que les produits issus du recyclage mécanique. Ces procédés sont bien adaptés au traitement des déchets propres de polystyrène, de PMMA et de Nylon 6.

Dans un sens plus large, on englobe également dans la catégorie « dépolymérisation » les procédés de **pyrolyse rapide** des déchets plastiques qui conduisent à la production :

- d'une huile pouvant être valorisée énergétiquement sur le site de production ou valorisée (matière ou énergie) dans un autre procédé
- d'un gaz pauvre qui est le plus souvent brûlé sur site pour fournir l'énergie nécessaire à la réaction de pyrolyse et au séchage éventuel de la charge entrante
- d'un sous-produit solide (coke de pyrolyse) constitué du carbone fixe et de la fraction incombustible du déchet traité.

La pyrolyse rapide permet de traiter des mélanges pollués. Il est toutefois nécessaire de limiter la teneur en PVC et en métaux lourds. Le rendement matière des procédés récents peut atteindre 70% en huile et 15% en gaz (soit un rendement global de 85%). Il est d'autant plus élevé que la charge contient une proportion importante de plastiques.

Les procédés de **pyrolyse rapide catalytique** des déchets plastiques constituent une innovation décisive. Le procédé le plus simple, à un seul étage, implique que le polymère et le catalyseur soient en contact. Le système à deux étages consiste en une dégradation thermique initiale, suivie d'un reformage catalytique des vapeurs produites.

Certains catalyseurs très sélectifs permettent de produire des hydrocarbures spécifiques à forte valeur commerciale et d'empêcher la formation d'hydrocarbures chlorés (c'est intéressant dans le cas de déchets contenant du PVC).

On observe une forte diminution de l'activité des catalyseurs et donc du rendement des réactions, lorsqu'on traite des déchets plastiques contenant du PVC (effet poison du soufre et des vapeurs acides).

2- Degré de développement

Retour aux monomères à partir de déchets plastiques propres

Plusieurs procédés ont atteint le stade industriel (7) :

- Shaw (Nylon 6)
- DuPont Canada (Nylon 6)
- Sabic (PET et PBT)
- GE Plastics (PET et PBT)
- NURRC (PET qualité contact alimentaire)
- Eastman (PET)
- Polyflow (conversion du PS en styrène et en éthylbenzène)

- Plusieurs procédés de dépolymérisation thermique du PMMA (6).

Production d'huile de pyrolyse à partir de déchets plastiques plus ou moins mélangés

Aux USA, Plastic Advanced Recycling Corp. revendique l'exploitation d'unités industrielles consommant des déchets plastiques (films, corps creux...) y compris des déchets souillés, ainsi que des déchets hospitaliers, mais les informations disponibles sont peu précises.

Au Canada, Klean Industries Inc. revendique le traitement industriel de plastiques issus des déchets ménagers, pneus, DIB, déchets agricoles, films, RBA, DEEE :mais il semble qu'il s'agit de démonstrateurs.

En Pologne (Zabrze), une unité industrielle de traitement de déchets plastiques (polystyrène ?) serait exploitée depuis 1997 par AgRob EKO, S.A (capacité: 145 kt/an de plastiques usagés), pour la production de carburant diesel. Son caractère opérationnel n'a toutefois pas été confirmé.

Au Japon, l'unité de dépolymérisation exploitée par la société Hosokawa-Yoko Co. située à Fujioka (préfecture de Gunma), d'une capacité de 5 à 6 t/jour, utilise des déchets de production provenant d'une unité de fabrication d'emballages secondaires en laminé carton/LLDPE. Ils sont dépolymérisés en huile et utilisés pour réduire la consommation d'énergie fossile du site.

Par contre, les unités de Mogami Kiko (préfecture de Yamagata) de MCC Co Ltd. et d'Altis Co. Ltd ont été stoppées. Ces unités étaient exploitées par des sociétés privées (Altis traitait des déchets hospitaliers fournis par une filiale d'Olimpus Camera Co. Ltd.).

La société belge Comet Traitement développe un procédé de dépolymérisation du RBA (projet Phoenix) avec un pilote industriel de 1800 t/an situé à Obourg. Les déchets utilisés sont constitués de refus de tri de RBA (« fluff léger », densité 0,1) dont le coût de mise en décharge est très élevé. Ce déchet est riche en mousses, bois, plastiques techniques, caoutchoucs et métaux résiduels. Son PCI est d'environ 23 kJ/kg. Ces déchets sont traités par craquage catalytique dans un réacteur chauffé à 550°C avec des sels fondus. Les produits de réaction sont constitués de 10% d'eau, 43% d'hydrocarbures, 20% de carbone (obtenu après un post-traitement de la matière carbonée résiduelle récupérée après l'étape de craquage catalytique), 20% de cendres qui constituent actuellement le résidu ultime du procédé, 2% de métaux ferreux et 5% de métaux non ferreux. La distillation des hydrocarbures conduit à trois coupes (essence, diésel et coupe « goudronneuse »). Dans le projet industriel élaboré par Comet Traitement, les deux coupes carburant alimenteront des moteurs de groupes de cogénération en vue de la vente d'électricité et de chaleur sur le réseau. Les métaux seront récupérés (on estime que leur revente représentera 40% du chiffre d'affaires). La fraction goudronneuse sera recyclée à l'entrée du procédé.

3- Post-traitements envisageables

Qu'il s'agisse de l'option « Retour aux monomères à partir de déchets plastiques propres » ou de l'option « Production d'huile de pyrolyse à partir de déchets plastiques plus ou moins mélangés » on obtient, dans des proportions variables selon la nature des déchets utilisés :

Une huile pouvant être retraitée et raffinée (8) afin d'obtenir une base pétrochimique du type naphta ou plus généralement des polyoléfines à chaînes C₅-C₁₀.

Un mélange gazeux pouvant être craqué thermiquement pour produire un gaz exempt de fraction condensable (goudrons). Après épuration, ce gaz est directement utilisable dans des moteurs à gaz ou des turbines à gaz.

Du coke pouvant être :

- soit brûlé pour fournir l'apport thermique nécessaire à la pyrolyse (pyrogazéification).
- soit utilisé comme un combustible secondaire, s'il n'est pas trop chargé en éléments polluants (les polluants du déchet restent majoritairement dans le coke du fait des basses températures de

traitement. Des opérations de lavage et de décendrage sont généralement nécessaires (4).
- soit gazéifié dans un dispositif séparé, après épuration.

IV.2 Opinion des experts

IV.2.1. Quelles sont les raisons des échecs rencontrés par certains procédés de dépolymérisation ?

La plupart des procédés développés depuis 15 ans dans le monde n'ont pas connu de développements industriels car ils s'avèrent trop coûteux. Outre le cœur du procédé constitué de la dépolymérisation, il est en effet nécessaire de prévoir des traitements de la matière entrante en amont (déchloration, tri...) et des produits en aval (distillation de l'huile...). De plus, la nécessité de prévoir des systèmes de traitement et de purification des sous-produits, en particulier des goudrons dans le gaz, n'a pas été suffisamment anticipée.

Pendant longtemps, les investisseurs se sont focalisés sur des unités de grande capacité, sans réaliser les contraintes que cela induisait en termes d'étendue des zones de collecte des déchets, ce facteur pénalisant fortement les coûts d'approvisionnement⁹.

Au Japon, plusieurs unités de dépolymérisation/distillation de déchets contenant des plastiques ont été fermées ces dernières années pour des raisons économiques et réglementaires : Niigata Plastic Oil Center (6 kt/an), Douo Oil Center (6 kt/an) et Sapporo Plastic Recycle (14,8 kt/an). La « concurrence » des unités de recyclage mécanique de plastiques localisées dans un rayon proche a joué un rôle clé. Par exemple, dans la région de Cyugoku, les unités n'étaient pas en mesure de lutter contre les grandes entreprises de recyclage mécanique situées dans cette zone, la réglementation donnant la préférence à ces dernières. Inversement, dans la région de Kanto, l'unité de Syowa Denko est restée viable car elle est moins concurrencée par des recycleurs au plan de ses approvisionnements en déchets.

IV.2.2. Quels gisements de déchets plastiques sont valorisables par dépolymérisation ?

Dépolymérisation thermique (retour aux monomères)

Ces procédés nécessitent des déchets propres, mono-composition, principalement des déchets de production et de transformation des plastiques.

Le retour au monomère des déchets de polystyrène en styrène est facile. Le rendement de dépolymérisation en styrène peut atteindre 85%.

Les déchets propres de PMMA (chutes de production d'articles sanitaires, enseignes, feux arrières d'automobiles, panneaux transparents pour la construction...) sont faciles à dépolymériser (rendement en monomère >90%). Ce procédé est pratiqué depuis une quarantaine d'années. Jusqu'à récemment on utilisait des bains de plomb fondu mais cette technologie est aujourd'hui interdite dans de nombreux pays pour des raisons environnementales. On essaie de développer des procédés alternatifs par micro-ondes ou par extrusion réactive.

La dépolymérisation thermique du Nylon 6 contenu dans les tapis et revêtements de sols usagés (déchets très hétérogènes) permet de se débarrasser des contaminants et des additifs, ce que ne permet pas le recyclage mécanique.

⁹ A titre d'exemple, un consortium d'industriels, avec entre autres BP et Total a travaillé il y a une vingtaine d'années sur un procédé de craquage non-catalytique de déchets de polyoléfinés sur lit fluidisé. Les différents tests ont bien marché au plan technique, mais la taille critique d'une unité industrielle aurait nécessité de collecter les déchets dans un rayon élevé, de l'ordre de 300 à 400 km.

Par contre, la dépolymérisation thermique des déchets propres de transformation de polyoléfines (éthylène à partir de PEBD, propylène à partir de PP) n'est pas envisageable au plan industriel car elle impose des températures sévères, des vitesses de chauffe très élevées et des temps de séjour courts dans les réacteurs. En outre, les monomères obtenus sont mélangés à de nombreux sous-produits et les rendements sont faibles.

Dépolymérisation en huile de pyrolyse

Les procédés de dépolymérisation acceptent les déchets plastiques en mélange, mais dans des limites assez strictes. En effet, s'ils sont trop mélangés et/ou souillés (par exemple des déchets ménagers non triés ou des DIB souillés) l'huile obtenue est difficile à valoriser du fait de ses caractéristiques médiocres. En outre, cela génère des difficultés opératoires. Les déchets doivent contenir un minimum de chlore et de métaux lourds et ne pas être souillés par des silicones et des huiles.

Compte tenu de ces contraintes, les déchets plastiques potentiellement candidats à un traitement par dépolymérisation en huile de pyrolyse sont principalement constitués des refus de tri de recyclables légers¹⁰, de fractions issues du sur-tri des résidus de broyage des VHU et des DEEE et de certaines fractions issues du sur-tri des déchets de construction/démolition.

Barquettes usagées issues de l'extension de la consigne de tri des emballages ménagers.

La dépolymérisation offre une solution pour valoriser ces déchets plastiques et répondre aux attentes des industriels, le recyclage mécanique d'une partie de ces déchets n'étant aujourd'hui pas complètement maîtrisé.

IV.2.3. Quelles précautions faut-il prendre en matière de préparation des déchets ?

La présence de thermodurcissables dans les déchets fait l'objet de nombreuses réflexions. La solution consistant à les séparer en amont est préférable car elle évite d'avoir à « chauffer de l'inerte » et n'a pas d'impact négatif sur la capacité de traitement. Si on ne les trie pas en amont, les thermodurcissables se retrouvent sous la forme de « cailloux » non transformés en sortie de réacteur et ils sont facilement récupérables dans les cendres.

D'autre part, les déchets plastiques contiennent souvent des traces d'huiles, de silicones ou de produits d'entretien, qui se retrouvent à l'état de silices organiques dans les produits de sortie. Ces silices produisent du sable en brûlant, qui est un « poison mécanique » pour les moteurs à combustion interne.

IV.2.4. Quels sont les atouts de la dépolymérisation catalytique ?

Le craquage catalytique (ou « dépolymérisation catalytique », ou « pyrolyse catalysée ») est développé entre autres par la société Comet Traitement (Belgique) et par PWMI (Japon). Ses principaux atouts sont une faible consommation énergétique et un meilleur rendement de conversion que les procédés de pyrolyse rapide conventionnels, la température opératoire étant plus faible.

Le procédé catalytique promu par le PWMI au Japon depuis 2011 est basé sur des unités d'une capacité de 1000 à 3000 t/an d'huile produite. Il est spécifiquement adapté au traitement de déchets plastiques. PWMI souligne que ce procédé est compétitif vis-à-vis de l'incinération et de la co-combustion en cimenterie, même à faible capacité, car il ne requiert ni déchloration préalable (dans le cas de déchets contenant des

¹⁰ Ce gisement présente des caractéristiques favorables à la dépolymérisation. L'un des blocages tient au fait que les refus de tri d'emballages appartiennent à Eco-Emballages. Cela limite leurs conditions de disponibilité.

produits chlorés), ni distillation en aval. Le gaz de pyrolyse est utilisé comme apport d'énergie en entrée du procédé. L'huile obtenue est riche en aromatiques¹¹. Le principal déterminant de la compétitivité est l'existence d'un bassin de collecte des déchets suffisamment étendu.

IV.2.5. Quelle est la capacité optimale des installations de dépolymérisation ?

Au Japon, les unités de pyrolyse / distillation en activité ont une capacité de 1 à 15 kt/an de déchets traités. Les coûts très élevés de mise en décharge des déchets (environ 350 €/tonne) ont stimulé la construction d'unités de faible capacité.



De son côté, Comet Traitement travaille sur un projet d'installation fonctionnant sur du résidu léger issu du tri du RBA d'une capacité de 60 à 70 kt/an.

En France, la fourchette optimale serait de 8 à 15 kt/an car la contrainte de disponibilité des déchets est forte, cela pour deux raisons principales : d'une part le recyclage mécanique ne laisse que les queues de tri au recyclage chimique ; d'autre part les cimenteries et les fours à chaux constituent un débouché « concurrent ».

IV.2.6. Quels sont les débouchés les plus prometteurs ?

Procédés de « retour aux monomères »

Le PMMA, le PS et le Nylon 6 obtenus par repolymérisation des monomères sont produits dans des conditions économiques acceptables. Alimentés en mélange avec les autres polymères dans une unité de traitement, on obtient des mélanges de cires et d'huiles difficiles et coûteux à séparer.

Procédés de fabrication d'huiles de pyrolyse

Plusieurs pistes sont envisageables pour valoriser les huiles produites, avec des horizons de développement différents:

La production d'électricité et de chaleur dans des unités de cogénération. Cette voie est la plus favorable. Le rendement électrique d'une chaudière CHP est de l'ordre de 35% alors que dans un incinérateur il ne dépasse pas 20-22%¹².

Cette piste est considérée comme la plus porteuse à court/moyen-terme. Son horizon de développement industriel est estimé à 4 ou 5 ans.

¹¹ Sa composition moyenne est la suivante : n-paraffines : 11% ; oléfines : 22,5% ; i-paraffines : 11,5% ; aromatiques : 45%.

¹² Ce n'est pas systématique. Pour certains procédés de gazéification ou certains types de déchets, le rendement énergétique de la gazéification est plus faible que celui de la combinaison incinérateur/cogénération.

La vente de l'huile à un raffineur, qui pourrait diluer dans la coupe de fond de colonne de distillation atmosphérique d'une raffinerie (ou à l'entrée de la colonne de distillation sous vide).

Le développement de cette voie semble peu probable à court terme car de nombreuses questions restent en suspens :

- Comment spécifier ces huiles, dont les caractéristiques sont fluctuantes?
- Quels profils d'acteurs pourraient-êtr intéressés par le traitement de ce type de produit (les raffineurs, ou des PME de la chimie dont l'activité est ciblée sur des produits précis) ?
- Les quantités envisageables sont-elles suffisantes pour intéresser les raffineurs ?
- Les raffineurs seraient-ils prêts à s'engager sur des contrats d'achat à 3 ou 5 ans, sur la base d'une qualité et d'un prix garantis ?
- Comment promouvoir l'émergence d'un véritable marché, condition nécessaire au développement de cette filière ?

Les raffineurs ne semblent pas prêts à acheter des huiles de dépolymérisation.

La transformation en carburant automobile se heurte également à plusieurs obstacles :

- La baisse récente des cours du brut. Il faudrait que le prix du baril dépasse durablement 100\$ pour que l'huile de pyrolyse devienne compétitive vis-à-vis des carburants issus des raffineries.
- Les faibles tarifs de la mise en décharge des déchets
- Des incertitudes subsistent sur la pertinence des procédés d'hydrocraquage permettant d'améliorer la qualité de l'huile de pyrolyse en vue d'un usage « carburant ». Ces procédés sont complexes et mal adaptés aux fluctuations de compositions inhérentes aux charges provenant du traitement de déchets plastiques. La question de la disponibilité de l'hydrogène est également une contrainte forte.

A contrario, la probable exonération de TIPP constituerait un facteur favorable au développement des applications « carburant automobile ».

L'utilisation des huiles de dépolymérisation comme combustible marin est envisageable, sous condition de respect de la teneur en soufre réglementée.

Le préchauffage des équipements des incinérateurs avec une chaudière auxiliaire n'est plus guère utilisé car le PCI de la charge traitée est généralement suffisant. On utilise du fioul en quantité très faible une ou deux fois par an pour accélérer la montée en température des équipements.

On réchauffe les fumées en sortie d'incinérateur pour éliminer les oxydes d'azote, mais cela se fait avec du gaz naturel.

IV.3 Synthèse

Procédés « retour aux monomère » à partir de déchets propres de PMA, PS et Nylon 6

Les procédés de retour aux monomères (à partir de déchets propres de production et de transformation de PMMA, Nylon 6, polystyrène) sont bien maîtrisés au plan industriel mais les volumes des gisements de déchets sont trop faibles en France.

Procédés de production d'huiles de pyrolyse à partir de déchets plus ou moins mélangés

Le Japon est le seul pays où la dépolymérisation catalytique des déchets plastiques s'est développée au plan industriel. Les coûts très élevés de mise en décharge constituaient une incitation forte. Les unités ont des capacités de 1 à 15 kt/an et s'appuient sur des zones de chalandise des déchets à l'échelle locale. L'absence de « concurrence » des unités de recyclage mécanique de plastiques au niveau local semble avoir joué un rôle clé dans les décisions d'investissements.

La réalité des autres unités recensées (Canada, USA, Pologne) est difficile à prouver.

En Europe, les procédés de dépolymérisation ne se sont pas développés comme on l'espérait il y a quelques années. La composition hétérogène des produits de réaction et la complexité des opérations de purification / retraitement accroissent fortement les coûts de production.

Les procédés de craquage catalytique constituent une piste « moins improbable » pour le traitement des refus de tri des RBA et des refus de tri de recyclables légers, à condition que ces déchets ne soient ni trop mélangés ni trop souillés.

La voie la plus prometteuse est la production d'électricité et de chaleur par cogénération à partir de l'huile de pyrolyse. Deux solutions pourraient également se développer, mais à un horizon plus éloigné : la dilution de l'huile dans le circuit du raffinage du pétrole et la fabrication de « carburant automobile ».

La transformation en carburant automobile se heurte à plusieurs obstacles (dont la baisse récente des cours du brut et les incertitudes sur la pertinence des procédés d'hydrocraquage en aval de la dépolymérisation). L'exonération de TIPP constituerait un facteur positif.

V. Procédés de solvolyse

V.1 Etat de l'art

1- Description des procédés / conditions opératoires

Réaction chimique d'un polymère en présence d'un solvant, conduisant théoriquement à la production des monomères de départ. En pratique, on arrive souvent à des produits différents des monomères de départ. Selon le solvant utilisé on parle de glycolyse (réaction avec des diols au-dessus de 200°C), méthanolyse (avec du méthanol), hydrolyse (avec de l'eau), aminolyse (avec des amines) et ammonolyse (avec de l'ammoniac) (4).

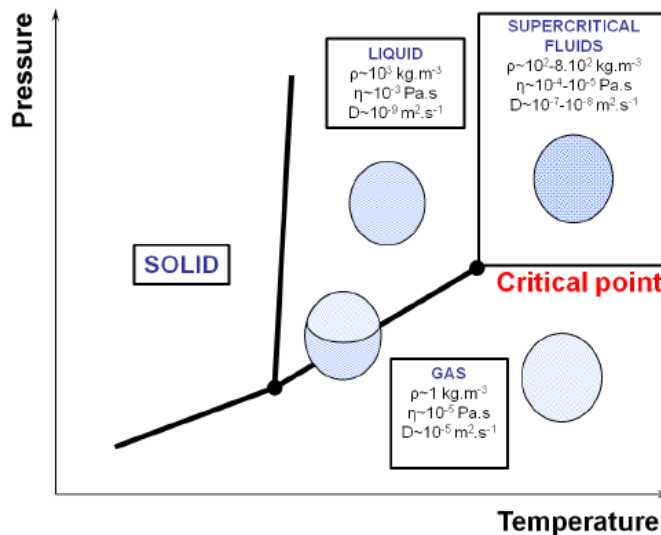
Les principaux facteurs de variation des produits de sortie sont le type de réacteur, le type de solvant, le temps de réaction, la température, la pression, la présence (ou non) d'un catalyseur et le type d'atmosphère (réductrice ou oxydante) (37).

Les procédés de solvolyse peuvent être classés en deux catégories selon leur cinétique. On distingue :

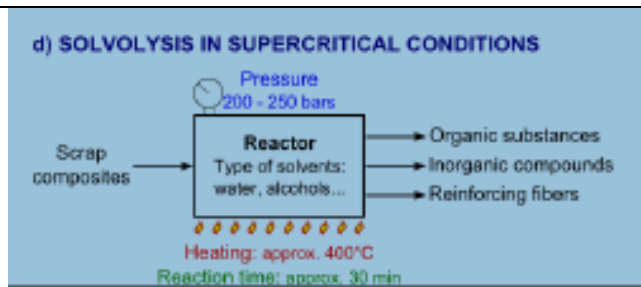
- la solvolyse « douce », qui présente des temps de réaction longs et utilise souvent des solvants toxiques nécessitant un recyclage.
- la solvolyse « sous pression et en température », en particulier la solvolyse subcritique et la solvolyse supercritique, qui utilisent des solvants « durables » (eau, CO₂) avec une cinétique rapide. Dans le cas où l'on utilise le solvant « eau », la solvolyse s'apparente à un hydrocraquage.

Quelques aspects clés de la solvolyse sub- et supercritique :

Un solvant atteint les conditions supercritiques lorsqu'il est au-dessus des conditions de pression et de température correspondant à son point critique (1), (37).



Le principal solvant sub- ou supercritique utilisé est l'eau. Lorsqu'elle atteint l'état sub- ou supercritique, l'eau devient progressivement apolaire. En milieu raréfié en oxygène, elle provoque une réaction d'hydrolyse des déchets plastiques, avec formation de chaînes courtes (16). On peut également utiliser du CO₂, certains alcools (méthanol, éthanol, isopropanol) et de l'acétone. La pression atteint 220 à 240 Bars, la température 150 à 400°C et la durée de réaction est de l'ordre de 30 minutes (procédé batch).



La solvolysse basse température constitue un progrès important car elle conduit à des fibres (souvent des fibres courtes) recyclées ayant des performances mécaniques élevées et dont les longueurs sont proches de celles des fibres vierges (37).

2- Déchets concernés et produits de sortie

La solvolysse est bien adaptée au traitement de deux catégories de déchets :

Déchets de polymères de condensation (5 ; 6)

La solvolysse conduit dans ce cas à une décomposition en monomères. Les déchets doivent être propres (déchets de production ou de transformation).

- Dans le cas des déchets de polyuréthane, la concurrence du recyclage mécanique est forte. Le principal problème rencontré par la solvolysse est la diversité du gisement (structures chimiques différentes des mousses souples, semi-rigides, rigides et élastomères).
- Dans le cas des déchets de polyamides, la solvolysse n'est pas capable de traiter les déchets mélangés PA6/Nylon (le Nylon et le PA6 ne pouvant pas être dépolymérisés par un procédé commun). Comme ces deux polymères sont souvent présents en mélange dans les moquettes, tapis..., la solvolysse n'est pas une bonne voie de traitement pour ces déchets de polyamides.
- La méthanolyse des déchets de PET conduit au DMT et à l'acide téréphtalique, qui peuvent être utilisés pour la synthèse du PET ou de mousses PU. Mais le marché est étroit. De plus, la concurrence du recyclage mécanique est rude pour les bouteilles, car il permet même des utilisations « contact alimentaire » des produits recyclés. Dès lors, la méthanolyse des bouteilles PET usagées n'est pas une voie prometteuse. S'il y a un marché, ce sont pour les applications textiles (polyester).

Déchets de composites fibre de verre/ polyester et de fibre de carbone / époxy

La solvolysse permet de préserver assez bien les propriétés mécaniques des fibres de carbone recyclées. Toutefois, les fibres recyclées ne sont pas continues comme les fibres vierges. Les fibres courtes issues de la solvolysse sont généralement réutilisées sous forme dispersée dans des thermoplastiques pour améliorer la résistance mécanique et la résistance thermique du produit final.

3- Stade de développement

Solvolyse « douce » (déchets de polymères de condensation)

Plusieurs procédés industriels sont opérationnels, principalement pour le traitement des déchets de production de fibres :

Déchets de PET

- Petcore
- Eastman Chemical

Déchets de polyamides

- DuPont (hydrolyse)
- Zimmer et Lurgi (hydrolyse à l'acide phosphorique).

Déchets de PET

- Teijin Ltd. (procédé EcoPET).
- Shin Nippon Air Technologies.

Le nombre d'unités industrielles opérationnelles n'est pas connu avec précision. Elles sont probablement basées en majorité dans les pays d'Asie, où les gisements de déchets de production de textiles synthétiques sont les plus importants.

Solvolyse sous pression et en température des déchets de composites

La solvolyse en milieu sub ou supercritique a été développée à l'échelle pilote au Japon dès 1995 (5).

Panasonic exploite une unité pilote depuis 2002, basée sur l'hydrolyse de matériaux composites dans de l'eau sous-critique. Capacité : 200t/an.

Solvolyse basse température

(5): Travaux de laboratoire de Liu et al., Chang-Sik et al. et Hitachi Chemical Co., Ltd sur la décomposition des composites fibres de carbone renforcées époxy par solvolyse à basse température.

Projets de recherche récents dans le domaine de la solvolysse sub- ou supercritique des déchets de composites

AERDECO

Recyclage des composites époxy/fibre de carbone de l'industrie aéronautique.

Partenaires : MCR, Sacmo, Dassault Aviation, ICAM, Mines de Nantes, Compositec, CTTM.

PARCCA

Partenaires : Airbus Nantes, DCNS Nantes, STX, ICAM Nantes.

Ce projet s'inscrit dans la suite d'AERDECO, avec une visée plus industrielle (optimisation de l'environnement du réacteur.....). Il a démarré en juillet 2014. L'ambition de PARCCA est de développer un pilote.

EURECOMP

Ce projet financé dans le cadre du 7^{ème} PCRD vise spécifiquement le recyclage des composites des transports de surface (automobiles, bateaux...).

Partenaires : MCR, Sacmo, ICAM, Compositec, BPF, Univ. Bristol, Univ. Exeter, Univ. Limerick, Volvo, Gaiker, Uriarte Safybox, Xietong Automobile Accessory, European Composite Recycling.

Période de réalisation : novembre 2007 à décembre 2011

Résultats : étude économique et organisationnelle de la filière, étude des gisements et débouchés des sous-produits, étude environnementale comparative aux autres procédés de recyclage. Construction d'un réacteur de 2 kg/h, avec un procédé par batch. Tests de recyclage des cartes électroniques à base de composites fibres de verre / époxy.

RECCO (REcycling Carbon fibre reinforced COmposites)

Procédé de solvolysse dans l'eau supercritique.

Partenaires : Innoveox, ICMCB, Hérakles (Safran), Astrium ST, Airbus Space and Defense et I2M. Période : 2009 à 2012.

Le projet a permis :

- de valider la qualité des fibres de carbone recyclées. Leurs propriétés mécaniques ne sont que de 5% inférieures à celles des fibres vierges
- d'approfondir le génie du procédé et de mettre en évidence les verrous pour passer au stade pilote
- de réaliser des ACV, qui ont montré que la solvolysse présente des atouts environnementaux par rapport à l'enfouissement
- de montrer la faisabilité d'un travail en batch (autoclave à 450°C, environ 1/2h par batch). Idéalement, l'objectif serait d'aller vers un procédé continu, mais personne pour l'instant ne sait comment faire.
- d'ébaucher un modèle économique, en montrant où il faudrait « placer le curseur » en termes de prix de vente des fibres de carbone recyclées pour que le procédé soit rentable. Toutefois, il faudra d'abord valider les modèles à l'échelle pilote.

Pour mémoire, le projet **PHENICS** (recyclage des composites aéronautiques), initié par Airbus et regroupant les participants d'AERDECO et de RECCO n'a jamais vu le jour faute de financement. Son objectif était d'approfondir les techniques de valorisation des fibres.

V.2 Opinion des experts

V.2.1. Quelles sont les raisons des échecs rencontrés par les procédés de solvolyse ?

La plupart des projets de recherche initiés à la fin des années 90 et au début des années 2000 dans le domaine de la solvolyse douce des déchets propres de résines phénoliques, de résines époxy, de PET, de polyamides et de polyéthylène n'ont pas connu de prolongements industriels en France¹³.

Plusieurs projets de recherche concernant la glycolyse du PET en continu, la glycolyse du PET en extrusion réactive et le recyclage chimique des déchets de PET en polyesters-polyols ont été mis en œuvre (dont plusieurs par le Ceremap) entre la fin des années 90 et 2006³³. Ils n'ont pas dépassé le stade des essais sur démonstrateurs. En Allemagne, la seule usine en activité a été fermée récemment du fait d'une corrosion excessive.

Les raisons sont avant tout économiques :

- des coûts élevés de préparation des charges
- des coûts d'exploitation élevés qui s'expliquent en particulier par la nécessité d'employer des matériaux nobles résistant à la corrosion et par les coûts de retraitement des solvants utilisés
- la faible valeur ajoutée des monomères ou des précurseurs organiques fabriqués.

Sur ces aspects économiques sont venus également se greffer des problèmes techniques de repolymérisation partielle en aval, conduisant à des produits de sortie constitués de mélanges complexes.

V.2.2. A quels types de déchets s'adresse la solvolyse ?

Les procédés de **solvolyse sous pression et en température** sont bien adaptés au traitement des **déchets de composites fibres de carbone / époxy**. Par rapport à la solvolyse douce, ils permettent de mieux contrôler les conditions de température et de pression selon les caractéristiques du déchet à traiter et de jouer sur les paramètres en se plaçant dans les zones les plus appropriées du diagramme de phase. En outre, l'utilisation de l'eau permet d'éviter les contraintes de retraitement du solvant.

Une application particulière est le recyclage de **pièces composites entières** dans des autoclaves de grande dimension, sans broyage préalable. La solvolyse permet de récupérer le « squelette » de l'objet, que l'on peut ensuite ré-impregner. C'est une voie prometteuse, qui offre beaucoup de souplesse au niveau des conditions opératoires. Le recyclage des clubs de golf, des pales d'éoliennes en composites polyester / fibres de verre et d'éléments de panneaux solaires sont des pistes possibles. Mais les contraintes opératoires sont fortes (four de grande dimension).

Très peu d'informations sont disponibles sur le procédé « **Valox IQ** » développé par SABIC pour le recyclage du PET usagé en PBT (9). Ce procédé est présenté comme une alternative au recyclage « bottle to bottle » des bouteilles usagées en PET. L'objectif est de produire du PBT recyclé chimiquement à partir de bouteilles PET, sachant que le prix de vente du PBT est de l'ordre du triple de celui du PET. Le bilan économique et environnemental du procédé semble toutefois mauvais. En effet, il faut repasser par le monomère pour pouvoir changer le « E » en « B » et cela demande beaucoup d'énergie (si cette voie était plus économique pour produire du PBT, c'est celle-là qu'on utiliserait). De plus, il faudrait des unités de grande capacité afin de faire jouer le facteur d'échelle, ce qui semble incompatible avec la taille réduite du marché du PBT.

¹³ A titre d'exemple, en 2002 et 2003, l'ADEME a financé 16 projets dont 8 dans le cadre des appels à projets sur les « Procédés de recyclage chimique des plastiques ». Les procédés étudiés étaient principalement l'extrusion réactive et la solvolyse.

La **solvolyse basse température** présente plusieurs avantages dans le cas des **composites fibres de carbone/époxy**. Elle permet de récupérer des fibres ayant d'excellentes propriétés mécaniques. Les longueurs des fibres sont proches de celles des fibres vierges. La qualité des fibres recyclées est meilleure qu'en pyrolyse (cette dernière dégrade les fibres du fait de la température plus élevée).

V.2.3. Freins à surmonter - Pistes de développement des procédés de solvolyse sous pression et en température

Les tests effectués dans le cadre du projet AERDECO ont montré qu'il faut des conditions opératoires différentes pour dégrader par solvolyse des composites époxy/fibre de carbone ayant des grades différents. Il y a des « fenêtres » de conditions à respecter (en particulier en termes de température) si l'on veut avoir de bons résultats. La question de la reconnaissance et du tri des pièces en composites, avec une différenciation par grades, est donc cruciale. On arrive facilement à reconnaître une famille de composites (par ex. un composite époxy/fibre de carbone) mais pas le grade spécifique.

L'un des inconvénients de la solvolyse des composites sous pression et en température est que la matrice est récupérée sous la forme d'un mélange de molécules très diverses, disséminées dans un milieu aqueux, à des concentrations unitaires faibles. L'évaporation est coûteuse et pénalise l'économie des procédés (cf. travaux de MCR avec Rhodia).

Des travaux sont en cours pour développer des catalyseurs simples qui permettraient d'obtenir des produits de réaction beaucoup plus purs. C'est une piste prometteuse, qui constituerait une véritable rupture technologique (cf. projet PARCCA).

Le bilan économique des procédés ne permet pas, pour l'instant d'envisager des développements industriels :

- Le coût extrapolé des fibres de carbone recyclées par solvolyse subcritique est proche de celui des fibres de carbone vierges. Cela signifie que le recyclage n'est pas compétitif compte tenu du différentiel de qualité (prix moyen de la fibre de carbone neuve : 20 à 40€/kg).
- Le prix de vente de la fibre de verre recyclée se situe autour de 2 €/kg et celui du polyester autour de 2 à 3 €/kg. Il n'existe pas de débouchés permettant d'atteindre l'équilibre économique dans ces conditions.

Le potentiel de rentabilité des composites fibres de carbone /époxy semble meilleur que celui des composites fibres de verre / polyester. Cela explique pourquoi les laboratoires accordent la priorité à la R&D sur les composites carbone / époxy. En outre, la R&D sur le recyclage des composites fibres de carbone/époxy est stimulée par la compétition entre Airbus et Boeing¹⁴, par la demande d'innovation du secteur automobile, par le déséquilibre du marché de la fibre de carbone (en forte sous-capacité de production au niveau mondial) et par les craintes d'un durcissement de la législation relative à l'enfouissement des déchets. Le gisement est pourtant faible en tonnage¹⁵.

¹⁴ Dans l'aéronautique, on observe depuis quelques années une nette évolution dans l'utilisation des composites fibres de carbone/époxy, depuis les pièces « secondaires » (du type plaquage) vers des pièces de structure de fuselage ou d'aile (Airbus A 350, Boeing Dreamliner).

¹⁵ 500 t/an en France en 2013 pour les fibres de carbone.

V.3 Synthèse

La **solvolyse « douce »** n'est pas compétitive vis-à-vis des procédés de recyclage mécanique qui prennent les gisements de déchets propres et homogènes après tri. En outre, les produits de sortie sont constitués de mélanges complexes. C'est pourquoi ces procédés ne se sont pas développés en France.

La **solvolyse « sous pression et en température »** convient bien techniquement aux déchets de composites fibres de verre/ polyester et fibres de carbone / époxy. Elle fait l'objet de nombreux travaux de R&D, surtout pour le traitement des déchets de composites fibres de carbone / époxy, mais on en est encore au stade des petits pilotes. L'enjeu économique de ce gisement de déchets va croître au fur et à mesure de l'augmentation des quantités de déchets de production dans le secteur de la construction aéronautique. Il reste cependant que la qualité des fibres récupérées est moins bonne, d'une part car elles ne sont pas orientées, d'autre part car elles sont plus courtes.

Plusieurs autres pistes de R&D offrent un potentiel, qui reste cependant à démontrer, surtout du point de vue économique :

- La solvolyse basse température des déchets de composites, qui conduit à des fibres recyclées ayant des performances mécaniques améliorées par rapport à celles obtenues par solvolyse sous pression et en température, et dont les longueurs sont proches de celles des fibres vierges.
- Le recyclage de pièces composites entières dans des autoclaves de grande dimension (pales d'éoliennes...)
- La séparation des déchets de composites selon leurs grades
- Le développement de procédés catalytiques à forte sélectivité
- Les techniques d'alignement des fibres recyclées.

VI. Procédés de dissolution

VI.1 Etat de l'art

1- Description des procédés / conditions opératoires

Les procédés de dissolution comportent les étapes suivantes : Lavage, broyage, séparation des corps étrangers, dissolution dans un solvant, filtration, précipitation, distillation du solvant.

Ce type de procédé sépare les chaînes moléculaires mais ne les casse pas. Il n'entraîne pas de modification chimique des polymères.

2- Stade de développement et références

Stade pilote

Le procédé CréaSolv (développé par le Fraunhofer Institut) est expérimenté sur plusieurs pilotes en Allemagne. Mais cela ne semble pas déboucher sur des réalisations industrielles (site Internet pas actualisé depuis 3 ans).

Plusieurs procédés de dissolution ont été développés pour traiter les déchets de polystyrène (6).

Stade industriel

- 1 unité de traitement de déchets PVC, sur procédés Vinyloop / Texyloop, située à Ferrare (Italie). Capacité de 7,5kt/an. L'installation comporte deux lignes, l'une sur procédé Vinyloop à partir de déchets de câbles en PVC pré-triés, l'autre à partir de bâches usagées en PVC. Le produit de sortie est un compound de PVC. Vinyloop vient d'ouvrir sa licence à l'international.

- 1 unité à Chiba (Japon) depuis 2006. Le niveau d'activité de cette unité reste toutefois très incertain.

3- Types de déchets

Le procédé CréaSolv a été testé avec succès (technique) sur des déchets d'EPS, ABS, PC/ABS, PR, PP, PET et multicouches. Ceci concerne principalement le recyclage des DEEE, du RBA (fluff, tableaux de bord multipolymères.....) et des déchets d'emballages. Il ne convient pas au traitement des thermodurcissables. Il est possible de traiter des mélanges de polymères, mais dans ce cas, la dissolution ne porte que sur l'un d'entre eux et c'est pénalisant au plan économique. Il est donc préférable de préparer les charges en effectuant un tri préalable.

Les procédés Vinyloop et Texyloop sont spécialisés dans le traitement des déchets de câbles et de bâches en PVC.

Les procédés de dissolution pourraient trouver des débouchés industriels dans le traitement des revêtements de sols PVC en fin de vie. En effet, le recyclage mécanique ne permet pas d'enlever certains additifs plastifiants et stabilisateurs¹⁶ que l'on ne veut pas retrouver dans les produits actuels. Si l'on veut recycler ces produits, il faut donc passer par des procédés de dissolution. Un tri visuel permet de séparer assez facilement les revêtements PVC des autres revêtements de sols (moquettes, linoléum, caoutchouc...). Par contre, les techniques de reconnaissance et de tri des revêtements PVC contenant ces additifs proscrits ne sont pas maîtrisées (pas de technique de tri en continu).

4- Atouts / inconvénients

L'atout principal des procédés de dissolution est de permettre de recycler le polymère lui-même, sans avoir à repasser par le monomère. La consommation énergétique est plus faible qu'en solvolysé traditionnelle, cette dernière obligeant à monter en température, à purifier puis à repolymériser.

¹⁶ Il s'agit principalement d'additifs dont les effets négatifs ont été démontrés par les études toxicologiques, tels que les stabilisants contenant des métaux lourds et le plastifiant DOP (dioctyl phthalate).

En outre, les produits obtenus sont de meilleure qualité et plus purs que ceux issus du recyclage mécanique.

Au plan environnemental, les solvants utilisés (par exemple l'acétone) sont sélectionnés pour leur point de flamme élevé afin de maximiser la sécurité et leur faible toxicité.

Le point sensible est la consommation d'énergie.

VI.2 Opinion des experts

Les procédés de dissolution ont l'atout de la simplicité. Pour l'instant, ils s'adressent en priorité aux déchets riches en PVC. Mais ils sont (trop) onéreux en termes de coûts d'exploitation.

Pour la plupart des experts interrogés, la nécessité d'utiliser des solvants toxiques constituerait un frein rédhibitoire (contraintes liées à REACH). Les concepteurs misent sur l'existence de procédés performants de recyclage des solvants et sur l'usage de solvants dont le point de flamme élevé maximise la sécurité.

La rentabilité économique ne semble pas au rendez-vous.

VII. Synthèse transversale des avis d'experts

L'objectif de ce chapitre est de synthétiser les opinions d'experts décrites dans les chapitres précédents.

On est donc encore dans la restitution des avis des experts et il s'agit avant tout de mettre en évidence leurs opinions sur les principaux points forts et points faibles du recyclage chimique des déchets plastiques, aujourd'hui et à court/moyen termes.

VII.1 Degré de développement du recyclage chimique

Trois catégories de procédés de recyclage chimique des déchets plastiques ont atteint la maturité industrielle au plan mondial :

- les procédés de **solvolysse « douce » des déchets textiles propres**.
- les procédés de **dépolymérisation thermique des déchets textiles** (polyester, Nylon 6) et des déchets de PMMA
- les procédés de **pyrolyse lente des composites fibres de carbone / époxy**.

Toutefois, aucune de ces trois catégories de procédés ne s'est développée en France, pour des raisons tenant à la faiblesse du gisement de déchets en ce qui concerne la solvolysse douce et la dépolymérisation thermique des déchets textiles et pour des raisons mal élucidées en ce qui concerne la pyrolyse lente des composites fibres de carbone / époxy.

Les procédés de **gazéification et de dépolymérisation (pyrolyse rapide) des déchets plastiques** commencent à se développer en Europe au plan industriel¹⁷, mais pas en France. En outre, la réalité de plusieurs références industrielles reste à confirmer (certaines installations pourraient être des démonstrateurs, voire être arrêtées). Ces procédés se heurtent en pratique à des problèmes techniques (bouchage, corrosion...) et de qualité, et donc de prix des produits obtenus, ce qui fait qu'il n'y a pas d'installation industrielle rentable.

Une unité industrielle basée sur le procédé de **dissolution** Vinyloop / Taxyloop est en exploitation depuis plusieurs années mais n'a pas essaimé du fait de ses coûts opératoires très élevés. Ce type d'installation ne peut exister qu'avec un soutien financier lié à des obligations légales de recyclage.

VII.2 Quels procédés pour quels déchets plastiques ?

La **gazéification** présente l'avantage de pouvoir traiter des déchets plastiques mélangés et souillés, y compris des mélanges multi-matériaux, en particulier les OMR, les DIB, les refus de tri de recyclables légers, les refus de tri de RBA et RBE. La présence de produits biosourcés en mélange avec les déchets plastiques à traiter est un atout.

Elle pourrait cependant bénéficier indirectement des effets de la réglementation REACH, qui risque de freiner le recyclage mécanique des déchets plastiques pour lesquels il est difficile de contrôler la présence d'éléments à l'état de traces (ex : plomb dans le PVC, broyats de DEEE contenant des retardateurs de flamme bromés). Elle pourrait constituer une solution pour atteindre les objectifs réglementaires de recyclage malgré cette contrainte.

La **pyrolyse lente** convient bien au traitement industriel des déchets de composites fibres de carbone/époxy. La pyrolyse basse température et la pyrolyse micro-ondes sont des voies émergentes dont

¹⁷ Au cours de l'étude, nous avons recensé une vingtaine d'unités industrielles de gazéification en exploitation ou en démarrage (+2 à 3 en construction) dans le monde, et 1 à 8 unités de dépolymérisation. La largeur de cette fourchette est due à l'incertitude sur la réalité industrielle des installations revendiquées par certains concepteurs de procédés. Il s'agit là de minima, car la présente étude n'avait pas pour objectif de dresser un inventaire exhaustif des installations.

les progrès sont à suivre attentivement car elles pourraient permettre d'améliorer l'état de surface et les caractéristiques mécaniques des fibres recyclées.

La **dépolymérisation thermique** avec retour aux monomères convient bien au traitement des déchets propres de PMMA, de PS et de Nylon 6. Les monomères issus du recyclage sont ensuite repolymérisés 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 l'avantage de pouvoir se débarrasser des contaminants (additifs...) contenus dans les déchets plastiques. En outre, elle permet de traiter des déchets hétérogènes (exemple du recyclage du Nylon 6 contenu dans les tapis et revêtements de sols). C'est un atout par rapport aux procédés de solvololyse.

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

La **solvololyse « douce »** n'est pas compétitive avec les procédés de recyclage mécanique. En outre, les produits de sortie sont constitués de mélanges complexes.

La **solvololyse « sous pression et en température »** en est au stade pilote. Elle semble bien adaptée au recyclage des composites fibres de carbone / époxy et fibres de verre / polyester. Elle constitue un progrès décisif par rapport à la solvololyse « douce » car elle permet de mieux contrôler les conditions opératoires par rapport aux déchets à traiter et de jouer sur les paramètres en se plaçant dans les zones les plus appropriées du diagramme de phase. Au sein de cette catégorie de procédés, la **solvololyse basse température des composites** en est encore au stade du laboratoire, mais devrait permettre d'obtenir des fibres recyclées ayant de bonnes propriétés mécaniques et des longueurs proches de celles des fibres vierges.

Le tableau de la page suivante récapitule les procédés de recyclage chimique les mieux adaptés aux différents types de déchets plastiques.

Quels procédés de recyclage chimique pour quels types de déchets plastiques ?

Procédés	Déchets plastiques mélangés et souillés (OMR, DIB...)	Refus de tri de recyclables légers	Refus de surtri du RBA	Refus de surtri des broyats de DEEE	Déchets de PVC (bâches, revêtements de sols, câbles....)	Déchets propres (de production ou de transformation)	Déchets de composites fibre de carbone / époxy
Gazéification (1)	+	+	+	+	(+)		
Pyrolyse lente							+
Dépolymérisation (retour aux monomères)						+ (PMMA, PS, Nylon 6)	
Dépolymérisation (pyrolyse rapide)		+	+	+		+	
Solvolyse sous pression et en température							+
Dissolution					+		

(1) Toutes les technologies de gazéification ne permettent pas de traiter ces différents types de déchets. Les réacteurs à lit fluidisé et à lit à flux entrainé couvrent le champ le plus large en termes de déchets. Les réacteurs à lit fixe couvrent un champ plus restreint.

VII.3 Quelles sont les technologies de gazéification les plus appropriées au traitement des déchets plastiques ?

.Les réacteurs à lit fluidisé et à lit entrainé sont bien adaptés à la gazéification des déchets plastiques. A contrario, les réacteurs à lit fixe ne sont pas appropriés.

VII.4 Quelles sont les voies de valorisation les plus appropriées pour le gaz de synthèse et l'huile de pyrolyse ?

Dans le cas de la **gazéification** des déchets plastiques, la voie « énergétique » (gazéification → turbine à gaz → électricité) présente des perspectives de développement à court terme meilleures que la voie « chimique » (gazéification → bases chimiques → synthèse) et la voie « carburant automobile ».

La **co-combustion du gaz de synthèse en cimenterie** pourrait constituer une piste intéressante, la plupart des cimenteries françaises ayant atteint leur seuil limite (légal, pas technique) d'utilisation de combustibles de substitution.

Dans le cas de la **dépolymérisation** des déchets plastiques par pyrolyse rapide, 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 court/moyen terme. L'horizon de développement industriel en France est estimé à environ cinq années (mise en route des premières installations). La production de carburants automobiles par transformation de l'huile de pyrolyse est envisageable à plus long terme.

La voie consistant à produire des bases chimiques ou pétrochimiques en vue de synthèses ultérieures s'avère totalement inexistante pour le moment car elle fait face à de nombreux obstacles.

VII.5 Quels sont les principaux freins à surmonter pour passer au stade industriel ? – Quelles sont les pistes de R&D prioritaires ?

Outre les freins intrinsèques de fiabilité technique, de qualité des produits obtenus et de rentabilité intrinsèque (sans obligation légale), les principaux freins exprimés par les experts interrogés peuvent être regroupés en 6 catégories :

- Les difficultés d'approvisionnement en déchets plastiques
- Les conséquences en matière de capacités de production
- Les limites des technologies actuelles de préparation des déchets
- La qualité insuffisante du gaz de synthèse (pour les procédés de gazéification)
- Le déficit de communication
- Le coût élevé du ticket d'entrée.

VII.5.1. Les difficultés d'approvisionnement en déchets plastiques

[Procédés concernés : Tous]

Le manque de déchets plastiques propres en quantités suffisantes constitue un problème majeur pour la plupart des industriels du recyclage mécanique, les déchets les plus propres ayant tendance à partir vers

l'Asie¹⁸. Les recycleurs français se sont adaptés à cette situation au prix d'investissements dans la préparation des déchets fortement souillés (installations de lavage)¹⁹.

En conséquence, dès lors que l'on considère des déchets plastiques propres, voire des déchets plastiques souillés mais pouvant être lavés (par exemple les films agricoles en polyéthylène), le recyclage chimique n'est pas compétitif vis-à-vis du recyclage mécanique car ses coûts de production sont plus élevés que ceux du recyclage mécanique²⁰. C'est donc ce dernier qui capte les gisements correspondants.

En outre, les faibles taux de collecte et le système actuel qui encourage la mise en décharge²¹ sont deux facteurs qui contribuent aux difficultés d'approvisionnement en déchets.

Dans ce contexte de raréfaction des déchets, les gisements de déchets plastiques disponibles pour le recyclage chimique se limitent aux déchets mélangés et / ou souillés ne pouvant être lavés dans des conditions économiques acceptables ou étant trop contaminés pour être recyclés mécaniquement, tels que les OMR, les fractions non-recyclables issues du sur-tri des résidus de broyage des DEEE et des VHU, les déchets mélangés de production et de transformation des plastiques, les refus de tri des recyclables légers, les DIB contenant des polymères en mélange, les refus de tri des déchets de construction/démolition et les plastiques agricoles usagés fins et très souillés.

Pour ce type de déchets, la gazéification offre une solution technique du fait de sa capacité à accepter des charges très hétérogènes (multi-matériaux et/ou multi-polymères). A contrario, la dépolymérisation est beaucoup plus contrainte par ses exigences de propreté des déchets.

VII.5.2. Les conséquences en matière de capacités de production

[Procédés concernés : Gazéification et dépolymérisation]

Compte tenu des contraintes mentionnées précédemment relatives aux difficultés d'approvisionnement en déchets plastiques, toute décision d'investissement doit être analysée à la lumière de deux critères antagonistes : la « logistique d'approvisionnement » et les « économies d'échelle ». Il s'agit d'optimiser simultanément :

- l'organisation de la collecte et des centres de préparation (VHU, emballages ménagers....) afin de limiter les coûts de transport,
- la capacité de l'installation. Le facteur « économie d'échelle » est une réalité indéniable, mais des unités trop grandes sont pénalisées par leur manque de flexibilité et par les difficultés d'obtention des permis de construire.

Il y a consensus au sein des experts interrogés sur le fait qu'il est préférable de faire primer la fiabilité, la sécurité de fonctionnement et la sécurité d'approvisionnement sur le facteur « économie d'échelle » et 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.

En outre, la modularité des technologies est un facteur clé d'amélioration de la flexibilité des installations de gazéification. Elle permet en effet d'augmenter progressivement la capacité d'un site en fonction de l'évolution des flux de déchets disponibles. Elle offre également la possibilité d'effectuer la maintenance sans avoir à arrêter toute l'installation. En revanche, elle engendre des surcoûts d'investissement et de fonctionnement.

¹⁸ Source : « Étude sur le positionnement et la compétitivité des industries du recyclage en France » – RDC Environment / AJI-Europe – Rapport final – Juin 2014 – Chapitre V.

¹⁹ Par exemple, le développement de la filière Adivalor a incité les recycleurs de film polyéthylène à se tourner vers les films agricoles, par nature fréquemment souillés.

²⁰ On ne dispose pas d'études comparatives entre les coûts du recyclage mécanique et ceux du recyclage chimique. Toutefois, l'opinion des experts interrogés est assez unanime sur ce point.

²¹ Cela devrait évoluer de manière significative dans les prochaines années.

VII.5.3. Les limites des technologies de préparation des déchets

[Procédés concernés : Gazéification, dépolymérisation]

Les attentes des industriels sont fortes pour améliorer le rapport « performance/coût » des technologies de préparation des charges.

La qualité des produits de réaction des procédés de dépolymérisation et de gazéification dépend en effet fortement de la présence de contaminants indésirables dans la charge, tels que le chlore, les métaux lourds, les silicones, les thermodurcissables et les inertes.

En outre, il existe une forte attente pour pouvoir mieux contrôler en continu les fluctuations des teneurs en contaminants et du PCI des charges à l'entrée du réacteur.

VII.5.4. La qualité insuffisante des gaz de réaction

[Procédés concernés : Gazéification, dépolymérisation]

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.

VII.5.5. Le déficit de communication sur le recyclage chimique

L'amélioration des procédés de recyclage chimique aux plans technique et économique est évidemment la condition première pour augmenter leur compétitivité intrinsèque. Toutefois, si l'on se place au stade de leur mise en œuvre, il semblerait que les barrières psychologiques constituent un obstacle non négligeable.

Parallèlement aux efforts d'amélioration de la compétitivité, des efforts de communication seraient donc indispensables en direction :

- des élus, afin qu'ils puissent disposer d'une information objective sur l'impact potentiel du développement du recyclage chimique sur l'environnement (dioxines, furanes, CO...) et sur les emplois
- des citoyens, pour les convaincre que le recyclage chimique et l'incinération ne sont pas similaires en termes d'impacts environnementaux
- des recycleurs, pour les convaincre que le recyclage chimique n'est pas un concurrent du recyclage mécanique.

VII.5.6. Le coût élevé du ticket d'entrée

Au niveau de la mise en œuvre, les concepteurs de procédés soulignent trois freins à surmonter pour pouvoir percer sur le marché du recyclage chimique des déchets plastiques :

- Le procédé doit avoir au moins une référence qui donne satisfaction dans la durée ;
- Le procédé doit être validé par un organisme national de contrôle indépendant ;
- Les demandes de permis et les études d'impact allongent fortement les délais.

Les deux derniers points pourraient être optimisés, afin de faciliter le travail des développeurs et des investisseurs.

VIII. Le point de vue des auteurs

VIII.1 Un consensus sur les questions clés

Nous n'avons pas observé de désaccord profond de la part des experts interrogés sur la situation actuelle du recyclage chimique des déchets plastiques en France et dans le monde et sur les principaux obstacles qui entravent son développement industriel à court et à moyen terme²².

Un (seul) point de divergence notable a été identifié au cours des échanges avec les experts. Il s'agit des perspectives de développement industriel des procédés de dissolution. La nécessité d'utiliser des solvants parfois toxiques est considérée par certains d'entre eux comme un handicap pénalisant leur développement. D'autres experts estiment au contraire que le développement de procédés performants de recyclage des solvants et l'usage de solvants à point de flamme élevé permettront de surmonter cet obstacle.

VIII.2 Les perspectives à court et moyen terme de développement du recyclage chimique des déchets plastiques ne sont pas encourageantes.

Le recyclage chimique n'entre en ligne de compte que lorsque le recyclage mécanique n'est pas possible, car ce dernier est plus simple, plus fiable et moins cher. Il n'a pas pour vocation de remplacer le recyclage mécanique, qui est sur un registre complémentaire.

Le recyclage chimique s'adresse donc à des flux de plastiques ayant au moins une des caractéristiques suivantes :

- mélangés à des inertes, souillés par des matières organiques inséparables...
- en mélange de différents plastiques ou de différents grades, différents additifs qui changent sensiblement les caractéristiques
- composites

Par ailleurs, le recyclage chimique des déchets plastiques est onéreux en raison des faibles capacités et de la complexité technologique. Il est donc rarement rentable par rapport à la valorisation thermique (Waste to Energy), voire à l'élimination (mise en décharge, incinération). 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).

La mise en place de certains de ces leviers a certainement contribué au développement d'installations industrielles de gazéification et de dépolymérisation (pyrolyse rapide) des déchets plastiques observé dans plusieurs pays d'Europe (Italie, Grande-Bretagne, Finlande....).

VIII.3 Le contexte français est particulièrement défavorable

Parmi les installations industrielles de recyclage chimique recensées, aucune n'est située en France. C'est le signe d'un environnement peu propice aux investissements et d'une grande prudence des décideurs vis-à-vis de ce type d'installation.

Outre les obstacles intrinsèques aux procédés eux-mêmes (cf. ci-dessus) le contexte français est pénalisé, entre autres, par le statut réglementaire trop rigide de la gazéification, par la lourdeur des procédures d'obtention des autorisations d'exploitation, par la difficulté de trouver des gisements de déchets stables, réguliers et d'une qualité suffisante à un coût acceptable (en particulier pour le CSR), par des tarifs de

²² Il est toutefois important de rappeler la réserve suivante déjà mentionnée en début de rapport : « Les avis présentés dans cette étude ne sont pas des avis consensuels. Il s'agit d'une compilation de différents avis. Chaque avis porte souvent sur des aspects spécifiques car chaque expert a des domaines spécifiques de spécialité ».

rachat de l'électricité peu avantageux et par une communication inadéquate vis-à-vis des élus locaux, des recycleurs mécaniques et des décideurs publics. Le handicap de compétitivité économique n'a pas fait à ce jour l'objet d'analyses détaillées.

VIII.4 Quatre couples « technologies-déchets » sont à considérer pour un éventuel support politique à leur développement

- les procédés de pyrolyse lente des déchets de composites fibres de carbone / époxy présentent des perspectives favorables à court-terme. Paradoxalement, ils se sont développés au plan industriel, mais dans d'autres pays d'Europe que la France alors que cette dernière dispose d'un secteur aéronautique puissant. L'étude n'a pas permis d'identifier la (les) cause(s) spécifique(s) de cette situation (coûts de main-d'œuvre élevés, poids de la fiscalité en France, localisation des gisements de déchets de production d'Airbus principalement hors de France ?). Peut-être est-ce dû au fait que la pyrolyse des composites conduit à l'obtention de fibres courtes d'une qualité insuffisante par rapport aux besoins.
- la solvolysse sous pression et en température des composites usagés, pour récupérer un squelette (pièces de grande dimension telles que des pales d'éoliennes) ou des fibres de carbone qui ont une valeur plus élevée que les plastiques. Les installations ne sont cependant pas encore au stade industriel et la fiabilité technique reste à démontrer à grande échelle.
- la dépolymérisation de déchets propres de PMMA. Il y a un enjeu du fait de l'interdiction des bains de plomb fondu pour des raisons environnementales. Des procédés alternatifs par micro-ondes ou par extrusion réactive sont en cours de développement.
- La pyrolyse rapide du RBA, des refus de tri de DEEE et des refus de tri des recyclables légers en est au stade de « pilote prometteur » et devrait permettre de récupérer du combustible de qualité. La rentabilité intrinsèque n'est pas démontrée mais il y a une pression forte pour augmenter le taux de recyclage des VHU et des DEEE, ce qui pourrait assurer une viabilité économique.

VIII.5 Les autres pistes présentent des handicaps rédhibitoires à leur développement en France

- Les technologies de gazéification et de dépolymérisation se heurtent à des problèmes techniques, de qualité des produits obtenus et de coût élevé qui semblent leur fermer la porte de la viabilité industrielle. Il y a des projets de gazéification et de pyrolyse rapide de déchets plastiques depuis plus de 20 ans. On a l'impression qu'on reproduit systématiquement le même scénario consistant à développer des projets ayant une base théorique de qualité (toujours plus ou moins la même) à l'échelle pilote et avec des flux suffisamment purs « pour pouvoir faire des bilans massiques et des mesures ».

Avec le recul du temps, on constate que les technologies de gazéification sont éprouvées d'un point de vue conceptuel, mais pas dans la pratique. Globalement, la gazéification est plus appropriée au traitement de déchets tels que le bois ou le charbon, qu'au traitement de déchets plastiques (pétrosourcés), ces derniers conduisant à des problèmes techniques (de bouchages, blocages suite à des dépôts de suie, corrosion et dégradation des installations) et à une qualité insuffisante des produits sortants (contaminants, variabilité de composition). Dès lors les conditions de fiabilité et, dans les conditions réglementaires actuelles, de rentabilité intrinsèque ne sont pas atteintes.

- Les procédés de dépolymérisation du Nylon 6 sont éprouvés industriellement et ont l'avantage par rapport au recyclage mécanique de pouvoir recréer une homogénéité de grades et d'enlever les additifs. Toutefois, cette technologie n'est pas appliquée en France car les flux de déchets y sont

trop restreints, les gisements disponibles étant surtout localisés dans les pays asiatiques gros producteurs de textiles.

- Les procédés de solvolyse « douce » ne sont pas compétitifs vis-à-vis des procédés de recyclage mécanique. 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, qu'il s'agisse de déchets de production ou de déchets post-consommateurs.

VIII.6 Quelle stratégie les investisseurs potentiels doivent adopter ?

La question se pose de savoir s'il est préférable d'investir dans des installations industrielles ou au contraire de suivre les évolutions, sans investir, et d'attendre de détecter une avancée clé qui rendrait tel ou tel procédé rentable ?

La deuxième option semble la plus appropriée car elle permet de minimiser les risques tout en restant à l'affût des opportunités qui pourraient se présenter à court/moyen-terme.

Nous préconisons :

- de soutenir la R&D sur des pistes très ciblées, pas forcément techniques (ces pistes sont décrites au VIII.8 ci-après).
- d'œuvrer activement en faveur d'une évolution des contraintes réglementaires. L'assimilation réglementaire de la pyrolyse/gazéification à l'incinération est inadaptée pour les procédés de seconde génération, de taille réduite et traitant des déchets triés. Cette assimilation a pour conséquences pratiques des délais très longs d'instruction pour les autorisations. En outre, les procédures pour la réalisation de pilotes préindustriels sont très lourdes et génèrent des contraintes, des surcoûts et des délais d'autorisations qui rendent le passage à l'échelle industrielle particulièrement difficile pour les sociétés innovantes.
- de rester prudent en matière d'investissement industriel en France, tout en surveillant les innovations et ruptures qui pourraient améliorer la compétitivité du recyclage chimique : ruptures en matière de R&D dans le domaine de la solvolyse sous pression et en température, avancées en matière de prétraitement des déchets, évolution du cadre réglementaire et fiscal (en ce qui concerne la gazéification et la dépolymérisation pour les deux derniers points).
- de prospecter les possibilités d'investissements dans d'autres pays européens présentant un contexte légal plus favorable, en particulier l'Italie et la Grande-Bretagne.

VIII.7 Quel modèle économique ?

Face au triple constat d'objectifs réglementaires de plus en plus stricts de valorisation des déchets plastiques, de l'incapacité du recyclage mécanique à traiter une partie des déchets plastiques souillés et en mélange et du manque de compétitivité économique des procédés de recyclage chimique, la question se pose de savoir quel mécanisme pourrait permettre d'assurer la rentabilité économique d'une filière « recyclage chimique », depuis la collecte jusqu'aux produits de réaction ou à l'énergie fabriquée.

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. Cela pourrait concerner, par exemple, 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.

IX. Conclusion

IX.1 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.

Le recyclage chimique présente l'avantage de pouvoir traiter, sous réserve de prétraitements appropriés des déchets, des flux de plastiques souillés par des inertes ou 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 élevés²³ 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).

Selon notre analyse, les seules pistes 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
- solvolysse 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 démonstrateurs²⁴, on constate qu'aucun projet industriel pérenne de gazéification ou de pyrolyse des déchets plastiques ne s'est concrétisé.

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 ces pays ou le recyclage chimique des déchets plastiques a commencé à se développer ?

²³ 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.

²⁴ 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.

- 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.

IX.2 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 liées 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.

Annexe 1 : Chronologie possible des actions

S'il était décidé de favoriser le développement du recyclage chimique, plusieurs leviers seraient susceptibles d'encourager les investissements.

Dix pistes d'actions sont déclinées ci-après pour mettre en œuvre ces leviers. Elles ont été établies en tenant compte des avis d'experts. L'ordre de présentation de ces pistes ne préjuge en rien de leurs degrés de priorité respectifs.

- 1: Améliorer la connaissance des gisements de déchets captables par le recyclage chimique
- 2: Optimiser les techniques de préparation des déchets
- 3: Améliorer la qualité des gaz de réaction
- 4: Optimiser les capacités des installations en projet
- 5: Pour la R&D relative à la solvolysse, s'en tenir à quelques pistes précises
- 6: Améliorer la communication
- 7: Exploiter les synergies potentielles au niveau de la R&D
- 8: Encourager la création d'unités de pyrolyse lente des déchets de composites fibres de carbone/époxy en France
- 9: Optimiser les procédures de contrôle qualité du design des installations
- 10: Optimiser la réglementation et la fiscalité.

Chacune de ces actions est décrite en détail ci-après, avec l'indication de la (des) technologie(s) de recyclage chimique concernée(s).

1: Améliorer la connaissance des gisements de déchets captables par le recyclage chimique

Procédés concernés : gazéification et dépolymérisation

Action: Réaliser une cartographie actuelle et en projection à un horizon de 20 ans, des gisements de déchets plastiques potentiellement captables par le recyclage chimique, en quantité et en qualité, par gisement, selon un maillage géographique suffisamment fin (niveau départemental ?) pour être utile aux investisseurs potentiels.

Champ géographique: France, UE 28.

2: Optimiser la préparation des déchets

Procédés concernés : Gazéification, dépolymérisation

Action

Améliorer le rapport performance / coût des technologies de préparation des déchets plastiques, en visant en priorité la réduction des teneurs en contaminants et la mesure / contrôle en temps réel des fluctuations de composition des charges (en particulier les teneurs en contaminants).

Il s'agit surtout d'améliorer les techniques de tri en continu des déchets plastiques contenant des plastifiants, retardateurs de flamme et stabilisateurs interdits par la réglementation. Ces déchets constituent un gisement intéressant pour le recyclage chimique. Parallèlement, ce tri aurait l'avantage de générer des fractions complémentaires constituées de plastiques propres qui pourraient être traitées par recyclage mécanique.

Les gisements concernés sont certaines fractions issues du broyage des DEEE (enveloppes arrières des téléviseurs et autres écrans à tube cathodique, circuits imprimés, anciens casings d'ordinateurs, éléments de structure des anciennes photocopieuses et imprimantes, panneaux avant des fours micro-ondes...) et les revêtements de sols PVC contenant des stabilisants à base de métaux lourds, ou des plastifiants DOP (dioctyle phthalate)...

Procédé concerné : Dépolymérisation

Action: Optimiser le processus d'élimination des thermodurcissables contenus dans les déchets mélangés.

Procédé concerné : Solvolysse sous pression et en température

Action

Encourager la R&D relative au tri des déchets de composites selon leurs grades.

3: Améliorer la qualité des gaz de réaction

Procédés concernés : Gazéification, dépolymérisation

Actions

- ✓ Optimiser les transferts de chaleur et les circulations des matériaux au sein des procédés afin de réduire la formation de goudrons colmatants et la génération de polluants.
- ✓ Améliorer les technologies de post-traitement des gaz afin de bloquer les principaux polluants (soufre, chlore...) et les entrainements de particules dans les gaz. Plusieurs pistes sont envisageables, telle que l'ajout de réactifs (chaux....) et sont variables selon les charges.
- ✓ Normaliser les produits de réaction (pour les gazéificateurs de 2^{ème} génération, avec gaz de synthèse commercialisable, donc débarrassé des goudrons) : L'absence de « garantie de qualité » des produits de réaction issus de la gazéification et de la dépolymérisation nuit à leur acceptabilité par les utilisateurs potentiels et constitue un obstacle à leur commercialisation. Il serait favorable de pouvoir caractériser ces produits de réaction par rapport à des normes existantes, voire par rapport à des normes nouvelles appropriées aux spécificités du recyclage chimique. Ce problème se pose (ou se posera) pour les gaz de synthèse produits par gazéification, pour les huiles de pyrolyse et pour les carburants issus de la pyrolyse et de la gazéification.

4: Optimiser les capacités des installations

Procédés concernés : Gazéification et dépolymérisation

Actions

- ✓ Concevoir un système d'aide à la décision (basé sur un modèle économique) permettant de déterminer la localisation géographique et la capacité d'une installation (ou d'un système d'installations interdépendantes) en optimisant le couple « aire de chalandise x coûts d'exploitation ».
- ✓ Encourager le développement des procédés basés sur des unités modulaires.

5: Pour la R&D relative à la solvolysse, s'en tenir à quelques pistes précises

Procédé concerné: Solvolysse sous pression et en température

Actions

Encourager la R&D dans les domaines suivants:

- ✓ solvolysse basse température des déchets de composites (fibres recyclées ayant des performances mécaniques élevées et dont les longueurs sont proches de celles des fibres vierges).
- ✓ recyclage de pièces composites entières dans des autoclaves de grande dimension (pales d'éoliennes, éléments de structure des avions...)
- ✓ séparation des déchets de composites selon leurs grades
- ✓ développement de procédés catalytiques à forte sélectivité
- ✓ techniques d'alignement des fibres recyclées.

6: Améliorer la communication

Procédés concernés : Gazéification, dépolymérisation

Actions

- ✓ Renforcer les argumentaires de communication. Outre la dimension « optimisation de la gestion des déchets », deux autres arguments de communication sont à mettre en avant:
 - l'impact positif (par rapport à la mise en décharge) du recyclage chimique au plan de la préservation des énergies fossiles, de la lutte contre le réchauffement climatique²⁵ et de l'indépendance énergétique française
 - la complémentarité entre le recyclage mécanique et le recyclage chimique. Le message à faire passer est : « le recyclage chimique et le recyclage mécanique sont complémentaires car le premier valorise des déchets que le second ne permet pas de valoriser ».
- ✓ Faire évoluer l'image du recyclage chimique aux yeux des élus locaux, des industriels et des décideurs publics, car il est souvent perçu négativement au plan de son impact environnemental et comme une voie « concurrente » du recyclage mécanique, susceptible de supprimer des emplois existants.

7: Exploiter les synergies potentielles au niveau de la R&D

Procédés concernés : Gazéification, Dépolymérisation

Actions:

Le contraste est fort entre les modalités de mise en œuvre de la R&D relative au recyclage chimique des déchets de composites d'une part et au recyclage chimique des déchets plastiques d'autre part.

- Malgré l'étroitesse du créneau en volume, on observe un foisonnement intense de la R&D relative au recyclage chimique (pyrolyse lente, solvolysse) des déchets de composites fibres de carbone/époxy et fibres de verre/polyester. Il s'agit en majorité de projets à l'échelle « petit pilote » ou « laboratoire », développés par des consortiums regroupant des centres de recherche, des PME « pointues » et des grands industriels. Ces projets sont largement financés par les pouvoirs publics français et/ou par l'Union européenne.
- A contrario, la R&D relative aux procédés de gazéification et de dépolymérisation des déchets plastiques (déchets ménagers, DIB, résidus de broyage....) a atteint un degré de maturité plus avancé. Elle est mise en œuvre de façon indépendante et confidentielle par des entreprises privées (majoritairement des PME) à travers le développement de pilotes et de démonstrateurs.

La dispersion des efforts de R&D ou d'ingénierie concernant les procédés de gazéification et de dépolymérisation des déchets plastiques est probablement à l'origine d'une perte d'efficacité. Il serait pertinent de « mutualiser » les efforts de développement sur des points auxquels tous les concepteurs de procédés sont confrontés, par exemple la modularisation des installations, l'amélioration des techniques de préparation des déchets plastiques et les logiciels d'optimisation « gisements de déchets » vs. « économies d'échelle ».

8: Encourager les investissements dans des unités de pyrolyse lente des déchets de composites fibres de carbone/époxy en France

Procédés concernés : Pyrolyse lente

Actions:

- ✓ Inciter des recycleurs à s'implanter en France sur ce marché à fort potentiel.
- ✓ Soutenir la R&D sur deux technologies innovantes prometteuses: pyrolyse catalytique basse température et pyrolyse micro-ondes.

9: Optimiser les procédures de contrôle qualité dans la phase de conception des installations

Procédés concernés : Gazéification, dépolymérisation

²⁵ Préalablement, il conviendra de s'assurer que ces atouts sont bien réels.

Action: Des problèmes d'« ingénierie » liés à la conception des unités semblent avoir fortement contribué à l'échec de certaines installations industrielles de recyclage chimique. Ces problèmes sont souvent liés à la difficulté du passage de l'échelle pilote à l'échelle industrielle. Afin d'éviter des erreurs de design auxquelles il est pratiquement impossible de remédier une fois l'installation construite, il serait utile que la profession s'organise pour définir complètement un référentiel de conception et d'industrialisation de ce type de procédé. Pour cela, il faudrait prendre exemple sur les procédures existantes dans des secteurs industriels matures.

10 : Optimiser la réglementation et la fiscalité

Procédés concernés : Gazéification et dépolymérisation

Actions

La production d'électricité et de chaleur dans des unités de cogénération apparaît comme la solution la plus favorable à court-terme dans le cas des unités de gazéification et de dépolymérisation. De ce fait, le tarif de rachat par EDF de l'électricité produite a un impact crucial sur la rentabilité de l'installation. Les conditions de rachat sont en principe similaires à celles qui prévalent pour la vente d'électricité produite par les installations d'incinération classiques, qui bénéficient d'un tarif de rachat de base de 5 à 9 c€/ kWh. Toutefois, les tarifs de rachat prévalant en France sont moins favorables que dans d'autres pays européens tels que l'Italie et l'Allemagne.

Trois actions sont prioritaires :

- ✓ Optimiser les tarifs de rachat de l'électricité produite. La rentabilité du recyclage chimique ne doit pas être évaluée uniquement sur son prix de revient. Les projets sont aujourd'hui pris en ciseau entre les prix élevés des déchets utilisés (prix de marché) et les faibles prix de la vapeur, du gaz ou de l'électricité.
- ✓ Faire évoluer la réglementation ICPE, afin que les technologies de pyrolyse et de gazéification ne soient plus assimilées à de l'incinération. Un positionnement clair des pouvoirs publics favoriserait le développement du recyclage chimique.
- ✓ Assouplir la contrainte réglementaire de réversibilité des installations, qui pénalise fortement les procédés de gazéification et de dépolymérisation (selon le principe de réversibilité, une installation de traitement de déchets doit être viable techniquement et économiquement lorsqu'elle fonctionne avec des énergies fossiles ou de la biomasse).

Annexe 2 : Bibliographie

	Titre	Auteur / Publication / Organisme	Année
1	Etat de l'art mondial et perspectives de développement des procédés de production de liquides ou de gaz à partir de déchets autres que la biomasse propre	AJI-Europe / ADEME	2012
2	European trends in the feedstock recycling of Plastic wastes	J.Agudao et al. / Global NEST Journal, Vol9, N°1, pp12-19	2007
3	Gasification Technologies Review - APPENDIX C. CASE STUDIES	TWE	2014
4	Pyrolyse – Gazéification de déchets solides - Etat de l'art des procédés existants - Faisabilité de traitement d'un déchet par Pyrolyse ou Gazéification	ADEME / Procedis	2004
5	Near Sub- and Supercritical solvolysis of Carbon Fibre Reinforced Polymers (CFRPs) for Recycling Carbon Fibres as a Valuable Resource: State of the Art	Christelle Morin, Anne Loppinet-Serani, François Cansell, Cyril Aymonier / CNRS, Université de Bordeaux, ICMCB	2012
6	Recyclage chimique des matières plastiques	Erdyn Consultants	2002
7	Conversion technology: A complement to plastic recycling	4R Sustainability, Inc. (USA)	2011
8	Recycling and recovery of post-consumer plastic solid waste in a European context	Brems Ankea, Baeyens Janb, Dewil Rafa	2012
9	Green method of manufacturing virgin PET/PBT from recycled products offers energy saving	Plastemart.com	2003
10	Caractérisation des gisements de déchets plastiques dans l'Union européenne	AJI-Europe (pour PlasticsEurope)	2000-2005
11	Recyclage des plastiques contenus dans les DEEE	ADEME	2005
12	Etat de l'art réalisé sur le tri et la valorisation des textiles d'habillement et du linge de maison consommés par les ménages (ADEME et EcoTLC, 2009 et actualisation 2012) : identification de différents acteurs/procédés du recyclage chimique.	RDC Environment	2009 / 2012
13	Etude sur la monétarisation des bénéfices du recyclage des plastiques (MEDDE, 2008) : Visite et modélisation du procédé de recyclage chimique Vinyloop.	RDC Environment	2008
14	Expertise du procédé TwinREC de gazéification des déchets développé par la société japonaise EBARA (ADEME, 2005)	RDC Environment	2005
15	Synthèse et analyse des retombées industrielles des études, thèses et travaux de R&D financés par l'ADEME entre 1990 et 2010 (ADEME, 2010). 85 fiches détaillées par procédé.	RDC Environment	2010
16	Plastic waste feedstock recycling, chemical recycling and incineration, Rapra	Tukker A. / Rapra Technology Ltd., Shropshire, United Kingdom	2002
17	Feedstock recycling and pyrolysis of waste plastics: converting waste plastics into diesel and other fuels	John Scheirs, Walter Kaminsky	2006
18	Feedstock recycling of polymers by pyrolysis in a fluidised bed W Kaminsky Corresponding author contact information	M Predel, A Sadiki	2004
19	Identiplast		2013
20	Investissements d'avenir: Feuille de route "Collecte - tri et recyclage"		2012

	Titre	Auteur / Publication / Organisme	Année
21	Projets financés par OSEO, ADEME, 7è PCRD, Programme éco-industries, Eco-Emballages, FUI, Programme européen éco-innovation		
22	Programme LIFE+		2007 / 2012
23	Programme ANR / Programme écotechnologies - écoservices (suite d'Ecotech, depuis 2012)		2009 / 2012
24	Le recyclage des composites à matrices thermodurcissables: "Expertise et innovation technologique en plasturgie"	Mathieu Schwander / PEP	2013
25	Harte Arbeit CFK-Abfälle	U. Deffke	2013
26	Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe im Fahrzeugbau – Ressourceneffizienz und Technologien	Dr. H. Eickenbusch, Dr. O. Krauss	2013
27	Development of New Recycling System for Used Plastics	Kazuyuki Hirabayashi / Showa Denko K.K. (Japan)	?
28	Etude sur le recyclage chimique du PVC -	TNO (Pays-Bas), pour la CE/DGIII	avant 2002 (cité dans l'étude erdyn)
29	Enhanced and Horizontal Recycling of FRP Using Subcritical Water	Advanced Technologies Development Laboratory / New Product Technologies Development Department (Panasonic Electric Works Co., Ltd., Japan)	Après 2008
30	Recycling carbon fibre composites	George Marsh	2009
31	Auto shredder residue recycling: Mechanical separation and pyrolysis	Department of Industrial Chemistry and Materials, University of Bologna, Italy Department of Chemical and Energy Technology, ESCET, Universidad Rey Juan Carlos, Espagne Instituto IMDEA Energy, Espagne	2012
	Titre	Auteur / Publication / Organisme	Année
32	Thermolysis of waste plastics to liquid fuel - A suitable method for plastic waste management and manufacture of value added products—A world prospective	Department of Chemical Engineering, National Institute of Technology, Rourkela, Orissa, India Jagannath Institute for Technology and Management, Parlakhemundi, Orissa, India	2010
33	Feedstock recycling from plastics and thermosets fractions of used computers. II. Pyrolysis oil upgrading	Romanian Academy, "P.Poni" Institute of Macromolecular Chemistry, Department of Physical Chemistry of Polymers, Roumanie. Ege University, Faculty of Science, Department of Chemistry, Turquie	2006
34	Methods for polyurethane and polyurethane composites, recycling and recovery: A review	Department of Chemistry, University of Agriculture, Pakistan	2007
35	Influence of time and temperature on pyrolysis of plastic wastes in a semi-batch reactor	Chemical and Environmental Engineering Department. School of Engineering, Espagne	2011
36	Procédés d'extrusion réactive.	F. BERZIN, G.-H. HU / AM 3654, Techniques de l'Ingénieur, Paris	2004
37	SGC International Seminar on Gazification - Malmö (Suède)		2014
38	The Ebara Advanced Fluidization Process for Energy Recovery and Ash Vitrification	15th North American Waste to Energy Conference - May 21-23, 2007, Miami, Florida USA Shunzi Suzuki, General Manager - International Engineering Group, Ebara Corporation	2007
39	Clean Technology Monographs – Feedstock Recycling of Plastic Waste	Royal Society of Chemistry	2005
40	White Paper - Alternative Waste Conversion Technologies	ISWA (International Solid Waste Association)	2013
41	Pyrolyse und Vergasung	Gleis, Markus / German Environmental Agency	2011
42	Mikrowellen unterstützt Tempern	R. Emmerich, S. Baumann	2013

