

SYNTHESE / EXTENDED ABSTRACT
FRANÇAIS / ENGLISH

**VALORISATION ENERGETIQUE DES DECHETS
PAR VOIE THERMOCHIMIQUE
(PYROLYSE, DEPOLYMERISATION, GAZEIFICATION)
RETOUR SUR LES DEVELOPPEMENTS PASSES
ET AVIS D'EXPERT**

***ENERGY VALORIZATION OF WASTE
BY THERMO-CHEMICAL PROCESSES
(PYROLYSIS, DEPOLYMERIZATION, GASIFICATION)
RETURN ON PAST DEVELOPMENTS. AN EXPERT VIEW***

juin 2017

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

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

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

Avertissement :

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

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

- ✓ Ce document est une synthèse du rapport référencé ci-dessous. Pour toute reprise d'informations, l'utilisateur aura l'obligation de citer la référence suivante :

RECORD, Valorisation énergétique des déchets par voie thermochimique (pyrolyse, dépolymérisation, gazéification). Retour sur les développements passés et avis d'expert, 2017, 139 p, n°14-0245/1A

- ✓ Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie)
www.ademe.fr

© RECORD, 2017

RESUME

La valorisation énergétique des déchets par voie thermo-chimique est un sujet à fort enjeu technico-économique et environnemental. Les techniques et procédés associés (pyrolyse, gazéification, dépolymérisation), font l'objet de recherches et développements permanents, souvent foisonnants, dans le but d'en améliorer les performances économiques et environnementales. Cependant, dans la multiplicité des innovations proposées, certaines ont fait, ou feront l'objet, d'échecs avérés, pour des raisons aussi bien techniques qu'économiques, freinant le développement de la filière, malgré son intérêt potentiel en valorisation énergétique.

Il est donc utile de dresser un historique desdits développements, en matière de valorisation thermo-chimique des déchets, passés ou en cours, des REX associés et d'identifier les causes des réussites et des échecs constatés ou prévisibles

Dans ce sens, vingt-sept procédés de conversion thermo-chimique de déchets, ayant été développé dans un passé récent en France et dans le monde, ont été étudiés, afin de distinguer ceux ayant été des succès de ceux ayant conduit à des échecs.

Pour chacun des exemples fournis, on a rappelé :

- Les principales caractéristiques du procédé mis en œuvre et de ses performances attendues,
- L'historique de son développement,
- Les raisons technico-économiques de son échec ou semi-échec, ou bien de son succès.

Cette analyse a permis d'identifier les principales causes techniques de ces échecs et d'apporter un certain nombre de recommandations concernant le développement de futurs procédés de conversion thermo-chimique des déchets.

MOTS CLES

Déchets, pyrolyse, gazéification, incinération, valorisation énergétique, procédés, succès, échecs

SUMMARY

Energy valorization of waste by thermo-chemical processes (pyrolysis, gasification, depolymerization) is the subject of ongoing research and development, often teeming with the aim of improving the economic and environmental performance. However, in the multiplicity of proposed innovations, some have been, or will be, proven failures, for both technical and economic reasons, constraining the development of the sector, despite its potential interest in energy recovery.

It is therefore useful to draw an historical development for thermo-chemical valorizations of wastes, past or present, associated feedback and to identify the causes of successes and setbacks encountered or foreseeable.

In this sense, twenty-seven waste thermo-chemical conversion processes, developed in the recent past, in France and in the world, were studied to distinguish between processes that have been successes, from processes that led to failures.

For each of the examples provided, it was recalled:

- The main features of the process implemented and its expected performance,
- The history of its development,
- The technical and economic reasons for the failure or partial failure, or of its success.

This analysis has permit to identify the main technical causes of these failures and make a number of recommendations for the development of future waste thermo-chemical conversion processes.

KEY WORDS

Waste, pyrolysis, gasification, incineration, energy conversion, successful/unsuccessful processes

La valorisation énergétique des déchets par voie thermo-chimique est un sujet à fort enjeu technico-économique et environnemental. Les techniques et procédés associés (incinération, pyrolyse, gazéification, dépolymérisation, ...) font l'objet de recherches et développements permanents, souvent foisonnants, dans le but d'en améliorer les performances économiques et environnementales.

Cependant, dans la multiplicité des innovations proposées, certaines ont fait ou feront l'objet d'échecs avérés, pour des raisons aussi bien techniques qu'économiques, freinant le développement de la filière, malgré son intérêt potentiel en valorisation énergétique.

Il est donc utile de dresser un historique desdits développements en matière de valorisation thermo-chimique des déchets, passés ou en cours, des REX associés et d'identifier les causes des réussites et des échecs constatés ou prévisibles, et ce, afin de mieux appréhender le cadre des développements à venir, potentiellement viables.

Les principaux procédés de conversion thermo-chimique de déchets, ayant été développés dans un passé récent en France et dans le monde, ont été étudiés :

- 11 procédés de pyrolyse,
- 3 procédés de dépolymérisation,
- 13 procédés de gazéification.

On commence par rappeler les principales caractéristiques des déchets bruts et des CSR, concernant leur état physique (masse volumique apparente, manœuvrabilité, viscosité apparente, ...), leur composition élémentaire, leur pouvoir calorifique et les différents modes de préparation de la charge entrante (tri, élaboration de CSR, ...).

La filière conventionnelle de valorisation énergétique des déchets par incinération et les technologies associées est rappelée.

On présente ensuite les principaux processus alternatifs, mis en jeu dans la conversion thermo-chimique des déchets (pyrolyse, dépolymérisation, gazéification) et les principales technologies associées.

La pyrolyse correspond à la décomposition thermique d'un déchet solide, sous l'action de la chaleur, en absence d'air ($O_2 < 1\%$), le transformant en résidu carboné (coke de pyrolyse), en liquides et en gaz, en défaut d'air et à pression atmosphérique. Cette réaction est globalement endothermique. On distingue la pyrolyse lente de la pyrolyse rapide suivant le niveau de température et la vitesse de chauffe utilisée, conduisant à une répartition massique différente entre les produits de la réaction (coke/gaz).

La dépolymérisation thermique, en particulier des déchets plastiques thermofusibles ou des pneus usagés, peut être obtenue par pyrolyse rapide, conduisant à la formation de liquides combustibles ou, éventuellement, à la régénération du monomère.

La gazéification est un processus endothermique, réalisé en atmosphère réductrice, qui permet de transformer des déchets solides, à haute température, en un gaz combustible dont les principaux constituants sont du monoxyde de carbone, du dihydrogène, du méthane, du dioxyde de carbone, de l'azote et de la vapeur d'eau.

On distingue deux modes de gazéification bien distincts :

- la gazéification de 1^{ère} génération, caractérisée par le fait que les intrants sont convertis en chaleur, c'est-à-dire que la combustion du syngaz est réalisée de manière intégrée au procédé de gazéification. L'énergie calorifique libérée peut alors être valorisée dans un ensemble chaudière/GTA,

Thermo-chemical treatments techniques and processes (pyrolysis, gasification, depolymerization ...), are the subject of constant research and development, often teeming, with the aim of improving the economic and environmental performance, as compared with incineration. However, in the multiplicity of proposed innovations, some have been, or will be, proven failures, for both technical and economic reasons, constraining the development of the sector, despite its potential interest in energy recovery.

It is therefore useful to retrace the history of thermo-chemical valorizations of waste, to realize a return on operating experiences and thus identify the causes of successes and failures.

In this way, twenty-seven waste thermo-chemical conversion processes, developed in the recent past, in France and abroad, have been studied to distinguish processes that have been successes, from processes that led to failures.

For each of the examples provided, it was recalled:

- *The main features of the process implemented and its expected performance,*
- *The history of its development,*
- *The technical and economic reasons for its failure or its success.*

This analysis made it possible to identify the main technical causes of these failures and to make a number of recommendations for the development of future waste thermo-chemical conversion processes.

The main characteristics of the raw waste and the RDFs are described, concerning their physical state (bulk density, maneuverability, apparent viscosity, etc.), their elemental composition, their calorific value and the different modes of preparation of the incoming feed (sorting, development of RDF ...).

The conventional method of energy recovery of waste by incineration and associated technologies are recalled.

The main alternative processes involved in thermo-chemical waste conversion (pyrolysis, depolymerization, gasification) and the main associated technologies are presented.

Pyrolysis corresponds to the thermal decomposition of a solid waste, under the action of heat, in the absence of air ($O_2 < 1\%$), transforming it into carbonaceous residue (pyrolysis coke), liquids and gases, in air-tied condition and at atmospheric pressure. This reaction is generally endothermic. Slow pyrolysis is distinguished from fast pyrolysis according to the temperature level and heating rate used, leading to a different mass distribution between the products of the reaction (coke / gas).

Thermal depolymerization, in particular heat-fusible plastics wastes or used tires, can be obtained by rapid pyrolysis, leading to the formation of combustible liquids or, optionally, to the regeneration of the monomer.

Gasification is an endothermic process, carried out in a reducing atmosphere, which makes it possible to convert solid waste, at high temperature, into a combustible gas whose main constituents are carbon monoxide, hydrogen, methane, carbon dioxide, nitrogen and water vapor.

There are two distinct modes of gasification:

- *1st generation gasification, characterized by the fact that the inputs are converted into heat, that is, the combustion of the syngas is carried out in an integrated manner in the*

- la gazéification de 2e génération, caractérisée par le fait que les intrants sont convertis en gaz de synthèse, mais l'énergie thermo-chimique des intrants n'est pas libérée et reste donc disponible. Le syngaz produit peut, après épuration en atmosphère réductrice, être valorisé en moteur thermique/TAG ou faire l'objet d'une valorisation matière (méthanation, synthèse chimique, ...).

On fournit ensuite, et ce, par mode de conversion thermo-chimique (pyrolyse, dépolymérisation, gazéification), les exemples les plus significatifs d'expériences réalisées, dans un passé récent, en France et à l'étranger, à échelle de pilote de démonstration ou à échelle industrielle, ayant, soit abouti à un constat d'échec, soit ayant nécessité des améliorations, soit enfin, ayant été des succès.

Les principaux procédés de conversion thermo-chimique de déchets ont été étudiés.

Dans chacun des exemples fournis, on rappelle :

- Les principales caractéristiques du procédé mis en œuvre et de ses performances attendues,
- L'historique de son développement,
- Les raisons de son échec ou de son succès.

A partir de la revue de ces différents procédés, on a cherché à identifier les causes de leurs principales pathologies, à savoir :

- Problèmes de coulabilité mécanique de la charge solide
- Problèmes liés aux défauts de préparation de la charge entrante
- Problèmes liés aux entrées d'air intempestives dans le réacteur
- Problèmes liés à la fusibilité d'une fraction du déchet
- Problèmes liés au mode de chauffage des réacteurs de pyrolyse
- Dépôts/encrassement par condensation des goudrons contenus dans les gaz de pyrolyse/gazéification
- Problèmes à la teneur du déchet entrant en éléments alcalins (Na, K)
- Problèmes liés aux processus de corrosion en atmosphère réductrice
- Problèmes d'arrêt/démarrage des installations
- Problèmes liés à l'abattage du syngaz en milieu réducteur
- Problèmes liés à l'absence de débouchés commerciaux des produits formés.

On fournit un certain nombre de recommandations, visant à éviter les principaux écueils rencontrés dans le choix et la mise en œuvre de procédés de valorisation des déchets par voie thermo-chimique.

La filière a sans doute fait preuve, par le passé, d'un excès de confiance en minimisant les difficultés de la transposition des technologies de conversion thermo-chimique, déjà largement maîtrisées pour la valorisation énergétique du charbon minéral ou de la biomasse propre, vers leur application aux déchets. Cependant, on a vu que, non seulement de nombreux procédés de ce type ont déjà démontré leurs fiabilité dans le domaine des déchets, mais également, que les bénéfices à en attendre sont importants en termes de rendement de valorisation énergétique des déchets.

De plus, les gazéificateurs permettent de traiter des déchets à forts PCI (PCI > 4-5 MWh/t), de type CSR.

En termes de valorisation énergétique des déchets, on a vu qu'une installation de gazéification de 1ère génération, permet une amélioration voisine de 30% du rendement énergétique potentiel de valorisation, par rapport à une unité conventionnelle d'incinération, à même puissance PCI entrante, grâce à une combustion homogène du syngaz, à faibles excès d'air (e ~ 10-15%).

gasification process. The heat energy released can then be upgraded in a boiler / turbine-generator unit,

- *2nd generation gasification, characterized by the fact that the inputs are converted into syngas, but the thermo-chemical energy of the inputs is not released and therefore remains available. The syngas produced can be, after purification in a reducing atmosphere, recovered with a thermal engine / gas turbine or be subjected to a material recovery (methanation, chemical synthesis, etc.).*

The most significant examples of recent thermo-chemical conversion experiments conducted in France and abroad, at scale demonstration or industrial-scale pilot scale are presented, each having resulted either in failure or requiring improvements, or having been successful.

The main processes of thermo-chemical conversion of wastes have been studied.

In each of the examples provided, it is recalled:

- *The main characteristics of the process implemented and its expected performance,*
- *The history of its development,*
- *The reasons for its failure or its success.*

From the review of these different processes, we sought to identify the causes of their main pathologies, namely:

- *Problems of mechanical flow ability of the solid charge*
- *Problems related to incoming load preparation faults*
- *Problems associated with inadvertent air intakes in the reactor*
- *Problems related to the fusibility of a fraction of the waste*
- *Problems related to the heating mode of pyrolysis reactors*
- *Deposits / fouling by condensation of the tars contained in the pyrolysis / gasification gases*
- *Problems with the content of the input waste in alkaline elements (Na, K)*
- *Problems related to corrosion processes in a reducing atmosphere*
- *Stop / startup problems*
- *Problems related to the slaughter of syngas in a reducing environment*

A number of recommendations are made to avoid the main pitfalls encountered in the selection and implementation of thermo-chemical waste recovery processes.

The sector has undoubtedly demonstrated, in the past, an excess of confidence by minimizing the difficulties of transposing thermo-chemical conversion technologies, already largely mastered for the energy recovery of mineral coal or clean biomass, towards their application to waste.

However, it has been seen that not only have many such processes already demonstrated their reliability in the field of waste treatment, but also that the benefits to be expected are significant in terms of the energy recovery efficiency of the waste.

In addition, the gasifiers make it possible to treat waste with high LCV (LCV > 4-5 MWh / t), type RDF.

In terms of energy recovery of waste, it has been seen that a 1st generation gasification plant allows an improvement of about 30% of the potential energy recovery efficiency compared to a conventional incineration unit with the same incoming LCV power, thanks to a homogeneous combustion of syngas, with low excess air (e ~ 10-15%). Reducing the volume of flue-gases released to the atmosphere also reduces the size of the facility, thereby reducing its footprint and cost of equipment (Purchase Equipment Cost, PEC). The capture on CO₂-concentrated

La réduction des volumes de fumées rejetées à l'atmosphère, permet également la réduction de la taille de l'installation et par là, de son emprise au sol, ainsi que de son coût d'équipement (Purchase Equipment Cost, PEC).

La capture sur fumées concentrées en CO₂, telles qu'issues d'installations de gazéifieur intégré à fonctionnement modifié (oxy-gazéification intégrée avec FGR), est également accessible, contrairement aux incinérateurs.

En conclusion, les filières de gazéification de 1^{ère} et de 2^e générations, offrent de nombreuses perspectives d'amélioration de la valorisation énergétique des déchets, aussi bien en termes d'amélioration des rendements de conversion (chaleur/électricité), par rapport aux installations d'incinération conventionnelles, qu'en terme de mise à disposition de nouveaux vecteurs énergétiques (méthane, hydrogène, ...), avec possibilité de capture du CO₂ avant rejet à l'atmosphère.

flue-gas, such as from integrated gasification plants with modified operation (integrated oxy-gasification with FGR), is also accessible, unlike incinerators.

In conclusion, the first and second generation gasification modes of gasification offer many prospects for improving the energy recovery from wastes, both in terms of:

- improvement in conversion efficiency (heat / electricity),*
- availability of new energy carriers (methane, hydrogen, etc.)*

together with the possibility of capturing CO₂ before the flue-gases are being released to the atmosphere.