

Une solution pour valoriser des déchets plastiques en oléfines légères

Résumé La gestion des déchets plastiques est aujourd'hui une préoccupation majeure de la société et nécessite de nouvelles ruptures technologiques. Cet article traite du développement d'une nouvelle approche singulière pour la valorisation de ces déchets en oléfines. Cette approche implique le prétraitement des plastiques usagés, leur gazéification (avec la dernière technologie de réacteur Vortex), la purification du gaz de synthèse, et enfin la synthèse Fischer-Tropsch couplée à une modélisation cinétique. Cette voie prometteuse de valorisation des déchets plastiques et de production durable d'oléfines légères est susceptible de remettre en question les technologies conventionnelles telles que le craquage des fractions d'hydrocarbures et la technologie de transformation du méthanol en oléfines. Le savoir-faire généré par les partenaires universitaires dans ce projet est transféré à des entreprises européennes en France et en Belgique.

Mots-clés Économie circulaire, déchets plastiques, recyclage, oléfines légères, réacteur Vortex, synthèse Fischer-Tropsch, microcinétique.

Abstract A solution to recover plastic waste into light olefins

The management of plastic waste is nowadays a major concern of society and requires new technological breakthroughs. This paper addresses development of a new and unique approach for valorization of plastic waste into olefins. This approach involves their pre-treatment, their gasification (using the latest Vortex reactor technology), the syngas purification, and finally the Fischer-Tropsch synthesis combined with kinetic modeling. This promising route to the valorization of plastic waste and sustainable production of light olefins is likely to challenge conventional technologies such as naphtha cracking and methanol-to-olefins technology. The know-how generated by the academic partners in this project is transferred to European companies in France and Belgium.

Keywords Circular economy, plastic waste, recycling, light olefins, Vortex reactor, Fischer-Tropsch, microkinetics.

Les plastiques sont omniprésents dans notre économie et notre vie quotidienne en raison de leur prix abordable et de leur large éventail de propriétés, telles que leur faible densité, leur solidité, leur durabilité, leur conception facile et leur résistance à la corrosion. Dans de nombreux domaines, les plastiques ont supplanté des matériaux conventionnels, comme le bois, les métaux et la céramique [1]. Au cours des cinq dernières décennies, la production mondiale de plastiques n'a cessé d'augmenter [2], atteignant 322 millions de tonnes (Mt) en 2015, et elle devrait doubler au cours des vingt prochaines années (figure 1).

Le projet PSYCHE

Seuls 30 % des plastiques usagés sont actuellement recyclés en France et en Belgique. Un grand volume de déchets plastiques est encore mis en décharge ou brûlé, entraînant un impact destructeur sur l'environnement et générant un coût financier important. Les préoccupations environnementales croissantes ont ainsi encouragé différentes stratégies de gestion de ces déchets.

La plupart des méthodes de recyclage se concentrent sur le recyclage en boucle ouverte, qui génère des matières plastiques de moindre valeur par rapport à leurs homologues initiaux, appelées « matières déclassées » (« downcycling »). En ce sens, la réutilisation des plastiques en circuit ouvert n'évite pas l'exigence des matériaux qui ne sont pas usagés, puisque les marchés haut de gamme ont toujours besoin de matières premières vierges. En outre, les besoins commerciaux en plastiques « déclassés » ne sont pas illimités. Dans ce contexte, le recyclage en boucle fermée, qui peut maintenir ou même



augmenter la valeur des plastiques usagés, est un véritable choix durable.

L'économie circulaire, dans laquelle les plastiques usagés sont réutilisés, recyclés et réintégrés, est de plus en plus encouragée par la Commission européenne, les régulateurs gouvernementaux et la société civile. En Europe notamment, de nombreux projets sont financés, comme le projet Interreg PSYCHE « Conversion des déchets plastiques en composants chimiques via un procédé de gazéification », qui a conduit au partenariat franco-belge constitué du Centre national de la recherche scientifique (CNRS), de l'Institut Centrale Lille, de l'Université de Gand, de l'Université catholique de Louvain

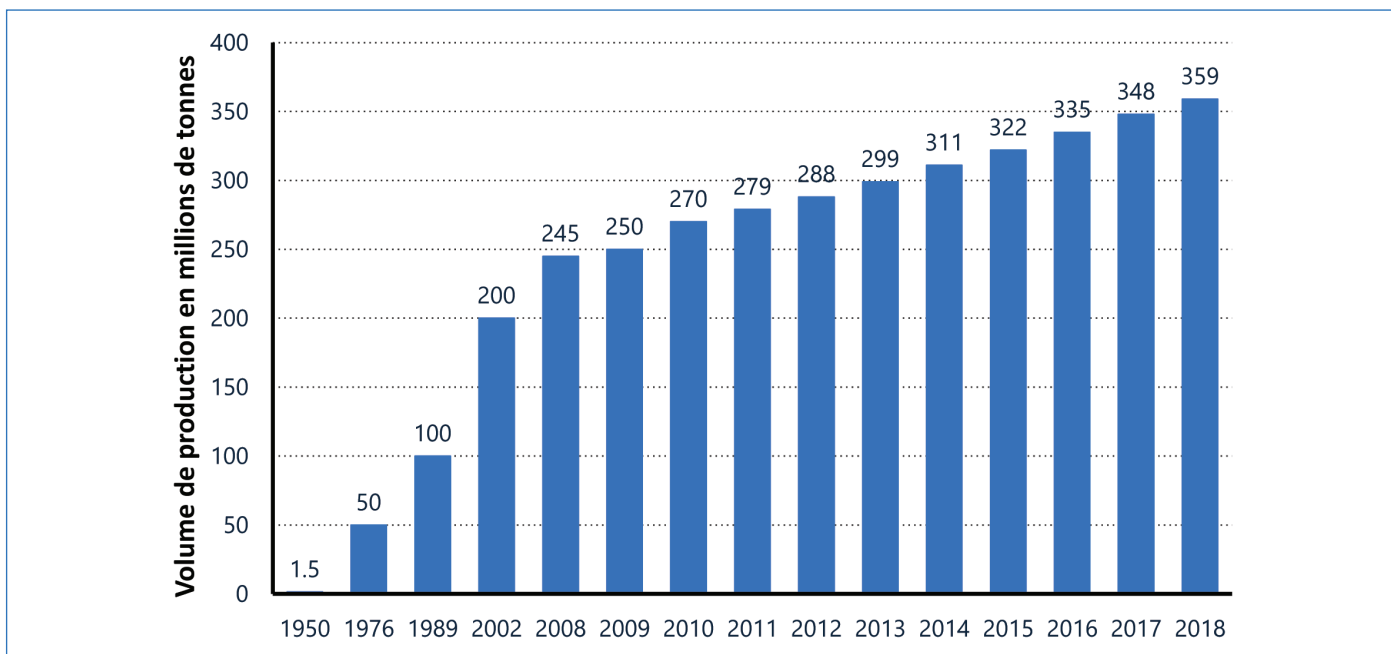


Figure 1- Production mondiale de plastiques (Plastics Europe (PEMRC) [2]).

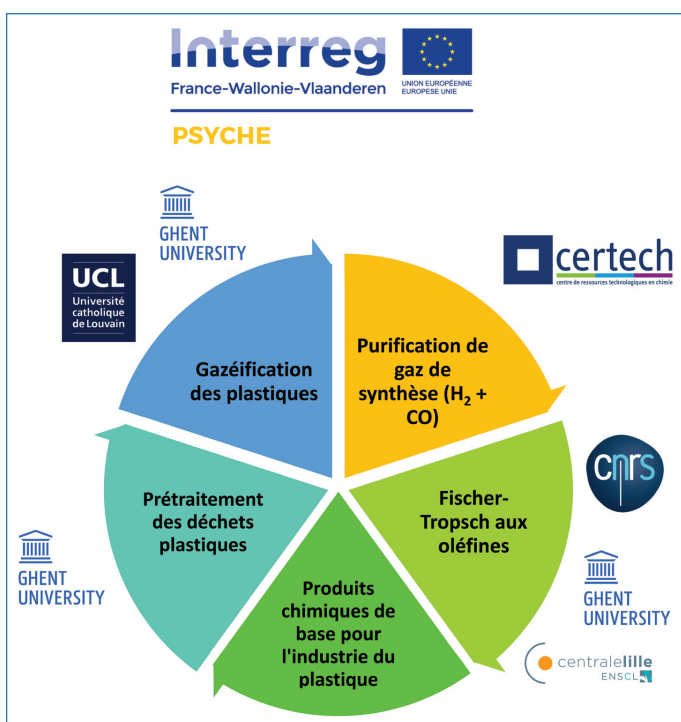


Figure 2 - Technologie intégrale de recyclage des plastiques élaborée dans le cadre du projet PSYCHE.

(UCL) et de CERTECH (plateforme R & D) (figure 2). La nouvelle approche singulière élaborée dans ce projet permet la production durable d'oléfines légères à partir de déchets plastiques. Elle implique le prétraitement des plastiques, leur gazéification (en utilisant la dernière technologie de réacteur Vortex), la purification du gaz de synthèse, et enfin la synthèse Fischer-Tropsch couplée à la modélisation cinétique par « single-event microkinetic » (SEMK).

Le recyclage du plastique

Dans le monde, les déchets plastiques font partie des déchets solides et représentent un mélange impur et diversifié de différents matériaux polymères. Le tri préalable des plastiques

avant leur recyclage est coûteux, demande du temps et aboutit souvent à des polymères de mauvaise qualité. Parmi les méthodes de gestion de ces déchets, la plus économique et la plus utilisée est la mise en décharge. Cependant, comme la matière plastique se dégrade très lentement, ce n'est pas une solution durable, en raison de l'espace limité des décharges et des conséquences environnementales dont la pollution des eaux souterraines, la dégradation de la végétation et la pollution atmosphérique. L'utilisation énergétique directe des plastiques peut être une alternative à la mise en décharge, comme par exemple la production de chaleur ou d'énergie par incinération. Malheureusement, les émissions toxiques produites lors de leur incinération entravent considérablement l'utilisation de cette technologie.

Une autre façon de gérer le problème des déchets plastiques est de les recycler. Plusieurs approches ont été envisagées et mises en œuvre au fil des années (figure 3). Le recyclage primaire des plastiques, également appelé ré-extrusion, consiste à réintroduire des déchets, des résidus industriels ou des mono-polymères lors de la polymérisation, afin de générer des produits de qualité similaire à celle du matériau d'origine [3]. Ce type de réutilisation n'est possible qu'avec des déchets semi-propres, soit non contaminés.

D'autre part, le recyclage mécanique secondaire (appelé recyclage secondaire), qui comprend la collecte, le tri, le lavage et la granulation des déchets, est l'une des stratégies de recyclage les plus intéressantes, car elle permet d'utiliser les plastiques comme matières premières dans d'autres processus de recyclage. Les plastiques doivent être triés avant le recyclage mécanique. Néanmoins, ce dernier type de recyclage n'est viable que pour les matériaux fabriqués à partir de plastique mono-polymère, par exemple polyéthylène, polypropylène, polystyrène, etc. Plus les déchets plastiques sont complexes et contaminés, plus leur recyclage mécanique est difficile.

Enfin, le recyclage chimique (tertiaire) permet de convertir les déchets plastiques en molécules plus courtes, généralement en liquides ou en gaz. Ces molécules peuvent être utilisées comme matières premières pour la génération de nouveaux produits pétrochimiques et plastiques. Récemment, l'intérêt

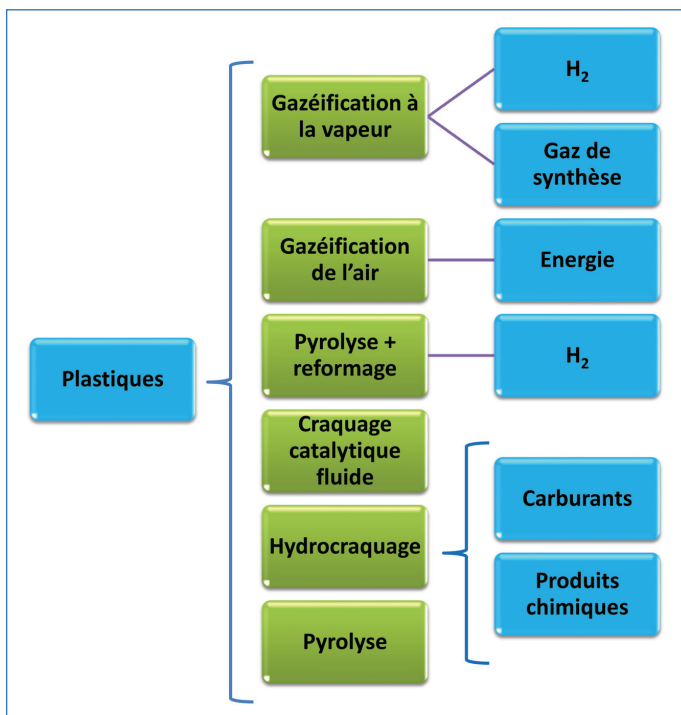


Figure 3 - Voies de valorisation chimique des déchets plastiques.

pour le recyclage chimique afin de fabriquer différentes fractions d'hydrocarbures à partir de déchets plastiques solides a considérablement augmenté. Bien que le recyclage chimique soit coûteux et nécessite de grandes quantités de plastiques usagés pour être économiquement viable, il est plus tolérant aux impuretés que le recyclage secondaire [4]. Dans le cadre du projet PSYCHE, l'Université de Gand se concentre sur le prétraitement des déchets plastiques. Les chercheurs travaillent actuellement sur des méthodes d'extraction d'additifs par solvants, sur la délamination des multicouches flexibles de films d'emballage par l'emploi d'acides carboxyliques, et sur le recyclage en boucle fermée de déchets plastiques polytéréphtalate d'éthylène multicouches et colorés par hydrolyse alcaline.

La gazéification des plastiques

Les partenaires du projet PSYCHE de l'Université de Gand et de l'Université catholique de Louvain travaillent sur la gazéification des déchets plastiques. Le principal avantage de ce procédé réside dans la possibilité de traiter des polymères hétérogènes, mixtes et contaminés en limitant le prétraitement des plastiques. Pendant plusieurs décennies, les matières premières de la biomasse [5] et du charbon [6] ont principalement été utilisées pour la gazéification. Cependant, l'utilisation de la gazéification pour le traitement des déchets plastiques a été rarement abordée dans la littérature. Les technologies de gazéification les plus courantes utilisent des réacteurs fonctionnant à des températures supérieures à 800 °C [7]. Ce procédé convertit presque tous les plastiques en un gaz combustible, également appelé gaz de synthèse, qui se compose principalement de CO et de H₂ avec quelques quantités de CO₂, de CH₄, d'hydrocarbures légers et de nombreuses impuretés [8]. Les principales réactions de la gazéification sont endothermiques et l'énergie nécessaire à leur déroulement est généralement fournie par l'oxydation d'une partie des matières alimentant le réacteur [9]. La gazéification peut être considérée

comme une séquence en plusieurs étapes, dont les principales sont les suivantes :

- le séchage (étape endothermique),
- l'oxydation (étape exothermique),
- la pyrolyse (étape endothermique),
- la réduction (étape endothermique).

Le séchage implique la vaporisation de l'eau incluse dans les matières premières. La quantité d'énergie nécessaire à cette étape est corrélée à la teneur en humidité. L'énergie nécessaire au séchage provient d'autres étapes de la gazéification. L'étape de pyrolyse implique un fractionnement thermochimique des composants carbonés de la matrice. Le clivage des liaisons chimiques se produit avec la génération de molécules de poids moléculaire inférieur. Selon les conditions, la pyrolyse produit différentes proportions de produits solides, liquides et gazeux.

L'étape d'oxydation génère du CO₂, de l'eau et d'autres produits d'oxydation. L'énergie thermique est nécessaire pour les étapes endothermiques et pour maintenir la température opérationnelle à la valeur souhaitée. L'oxydation est réalisée en déficit d'oxygène afin d'oxyder seulement une fraction des plastiques.

Enfin, lors de l'étape de réduction, les produits gazeux, liquides et solides réagissent en générant du gaz de synthèse. La gazéification des plastiques présente des particularités par rapport à la gazéification plus classique de la biomasse ou du charbon. Les propriétés spécifiques des déchets plastiques, en particulier le comportement « collant », la faible conductivité thermique, la formation importante de goudron et le contenu volatile élevé peuvent représenter un problème majeur pour l'exécution du processus. Au fil du temps, les réacteurs à lit fluidisé ont été largement utilisés pour la gazéification des déchets plastiques. En outre, d'autres types de réacteurs, comme les lits fixes, les lits à écoulement et les réacteurs à plasma ont aussi été testés.

À l'Université de Gand, la dernière technologie de réacteur Vortex a été élaborée pour cette étape de gazéification. Récemment, des chercheurs de l'Université catholique de Louvain ont découvert que les limitations des réacteurs à lits fluidisés classiques pouvaient être diminuées en fluidisant contre un champ de haute gravité (« high-G ») à l'aide de chambres Vortex [10] (figure 4). Dans le réacteur Vortex, pour

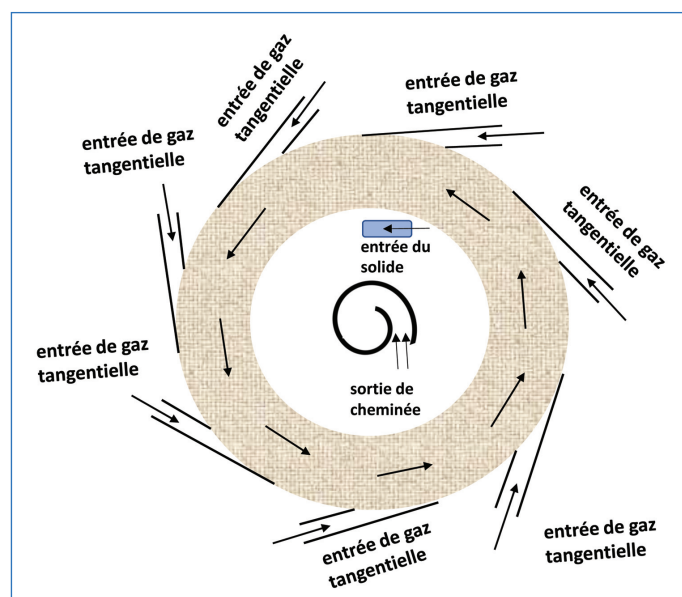


Figure 4 - Réacteur à un lit fluidisé rotatif dans une chambre à Vortex statique.

induire un mouvement de rotation, le gaz de fluidisation est injecté tangentiellement via de multiples fentes sur la paroi cylindrique externe de la chambre de fluidisation. À cause de la force de traînée tangentielle gaz-solide, les particules solides dans la chambre de fluidisation tournent également et subissent une force centrifuge radiale vers l'extérieur.

Les principaux avantages de ces lits fluidisés à haute gravité sont résumés ainsi [10-11] :

- ils peuvent fonctionner à une vitesse de glissement gaz-solide plus élevée et intensifient le transfert interfacial de masse, de quantité de mouvement et de chaleur ;
- le fonctionnement à « high-G » permet de réaliser le procédé avec un rapport élevé entre la largeur et la hauteur du lit du réacteur ;
- des temps de contact gaz-solide extraordinairement courts sont réalisables.

Malgré tous ses avantages, la gazéification des plastiques reste confrontée à plusieurs problèmes techniques et économiques. Le gaz de synthèse généré par le procédé peut avoir différentes concentrations d'hydrogène et de CO, ainsi que contenir diverses impuretés telles que goudrons, halogènes, soufre, particules, métaux lourds et composés alcalins.

Principaux composés et impuretés

La gazéification des plastiques effectuée avec ajout d'air en tant qu'agent oxydant produit un gaz de synthèse dont le pouvoir calorifique est d'environ 6,5-8,2 MJ m⁻³ [12]. La principale utilisation de ce gaz riche en azote est la combustion, et donc la production d'énergie. Par contre, la gazéification des plastiques effectuée avec de la vapeur en tant qu'agent oxydant permet de générer un gaz de synthèse sans azote, avec un pouvoir calorifique supérieur à 15 MJ m⁻³. Cette composition est appropriée pour les réactions chimiques [13]. Le rapport H₂/CO du gaz de synthèse dépend de la composition chimique des plastiques et des paramètres de gazéification. Le *tableau 1* résume les teneurs des principales impuretés constituant le gaz de synthèse après gazéification. Il contient également du CO₂, du méthane, des hydrocarbures légers et plusieurs impuretés, telles que HCl, HCN, NH₃, H₂S, et des goudrons condensables. Ces impuretés peuvent fortement affecter l'activité des catalyseurs pour la synthèse Fischer-Tropsch ; par exemple, le soufre empoisonne de manière irréversible les catalyseurs à base de fer et de cobalt car il adhère fortement aux atomes métalliques de surface (*tableau 1*).

Purification et conditionnement du gaz de synthèse

En raison de la grande sensibilité du catalyseur aux impuretés, les spécifications du gaz de synthèse sont particulièrement restrictives pour la synthèse Fischer-Tropsch. Une purification poussée du gaz de synthèse est indispensable pour atteindre les normes industrielles pour la conversion chimique. Cette tâche du projet est réalisée sur la plateforme R & D Certech.

Le gaz de synthèse peut être purifié à haute et à basse température. Les procédés d'épuration à chaud, qui se produisent à une température supérieure à 300 °C, sont d'une importance significative. Ils impliquent l'élimination des particules, qui se fait dans des cyclones, des filtres à lit mobile, des filtres céramiques, ainsi que la destruction des goudrons. En général, deux types d'approches sont prises en compte pour réduire le niveau des goudrons dans le gaz [14]. La première concerne l'optimisation de l'étape de gazéification elle-même. La température utilisée pour l'étape de réduction lors de la gazéification des plastiques a une fonction primordiale dans la détermination des propriétés du gaz de synthèse. Des températures plus élevées réduisent la formation de goudron. Cependant, elles pourraient favoriser le frittage des cendres et diminuer le contenu énergétique du gaz [15].

La seconde concerne les procédés de post-traitement qui opèrent en aval de la gazéification et qui peuvent inclure différents procédés tels que le craquage à haute température, les procédés catalytiques et l'épuration physique (filtration, lavage humide et précipitation électrostatique) [16].

L'épuration à froid du gaz de synthèse est la méthode traditionnelle, en raison de sa fiabilité reconnue et de sa grande efficacité pour l'élimination des impuretés. Elle peut être réalisée par voie « humide » ou « sèche ». Parmi ces deux méthodes, l'épuration du gaz froid par voie humide est le plus souvent choisie en raison de l'élimination facile et simultanée de multiples contaminants tels que HCl, NH₃ et H₂S, qui sont solubles dans l'eau. Par conséquent, des tours de lavage, des épurateurs et des cyclones fonctionnant avec des solutions aqueuses éliminent toutes ces impuretés en fonction de leur solubilité [17]. Les amines substituées, les carbonates et les solutions alcalines sont généralement utilisés pour le nettoyage par voie humide. Enfin, les impuretés résiduelles du gaz de synthèse peuvent être éliminées par adsorption à l'aide d'oxydes métalliques.

Tableau 1 - Contaminants présents dans le gaz de synthèse après gazéification des matières plastiques et leurs valeurs maximales autorisées pour la synthèse Fischer-Tropsch.

Contaminants	Teneur après gazéification (ppm)	Teneur maximal acceptable pour une application en Fischer-Tropsch (ppb)
Silice (SiO ₂)	10 000	0
Cendres	13 300	0
S (H ₂ S)	500	10
Hydrocyanure (HCN)	1 000	10
Cl (HCl)	1 000	10
Ammoniac	1 000	10
Aromatiques	10 000	0
Dioxine	5 000	0
Goudrons	2 000	0

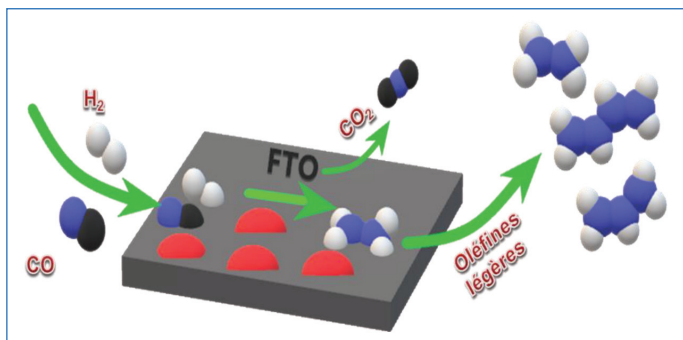
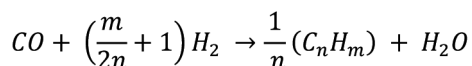


Figure 5 - Représentation simplifiée de la réaction FTO.

Une fois la purification du gaz de synthèse finalisée, il est souhaitable d'ajuster le rapport H_2/CO . En fonction des produits cibles et des catalyseurs de la synthèse Fischer-Tropsch, le rapport H_2/CO dans le gaz de synthèse doit être compris entre 1 et 2,2. Ce rapport peut être ajusté à l'aide d'une unité dédiée à la réaction « water-gas-shift » (WGS) ou survenir *in situ* pendant la réaction Fischer-Tropsch sur des catalyseurs à base de fer dont l'une des principales propriétés est leur activité en réaction WGS. La réaction de WGS fournit de l'hydrogène supplémentaire pour la synthèse Fischer-Tropsch [18] qui se produit selon l'équation suivante :



Promoteurs mobiles pour la synthèse d'oléfines légères à partir de gaz de synthèse

Les oléfines légères (éthylène, propylène et butylène) sont des molécules de base de l'industrie chimique et sont largement utilisées pour synthétiser des produits chimiques en bout de chaîne, comme les peintures, les solvants et les polymères [19]. Dans les technologies classiques [20], ces oléfines sont produites à partir du vapocraquage du naphta, du craquage de l'éthane et des procédés de transformation du méthanol en oléfines (« methanol-to-olefins », MTO) [21]. Dans le vapocraquage du naphta, la sélectivité en oléfines spécifiques est faible. Le craquage de l'éthane nécessite une température très élevée et ne produit que de l'éthylène. Le MTO présente une sélectivité élevée pour les oléfines légères, mais la technologie est multi-étape et implique la synthèse de produits intermédiaires. En outre, le catalyseur subit une désactivation rapide. Un nouveau procédé OX-ZEO fondé sur l'utilisation d'un seul catalyseur bifonctionnel combinant la synthèse du méthanol et le MTO a été récemment rapporté par des scientifiques chinois [22-23]. Les défis de la technologie OX-ZEO demeurent d'une part des rendements en oléfines insuffisants et d'autre part des conversions de CO très faibles.

Les oléfines légères peuvent être générées directement à partir du gaz de synthèse via la synthèse Fischer-Tropsch ; cette voie est connue sous le nom de FTO (« Fischer-Tropsch to olefins ») (figure 5). Les catalyseurs à base de fer ont un prix raisonnable et sont des catalyseurs de choix pour cette technologie. Leurs performances peuvent être considérablement améliorées par l'ajout de petites quantités de différents éléments, appelés « promoteurs de catalyseur ».

Récemment, dans le cadre du projet PSYCHE, nous avons découvert un nouveau type de promoteurs mobiles (en raison de leur faible point de fusion) [24-26]. La promotion avec l'étain et l'antimoine conduit à l'augmentation de la vitesse de

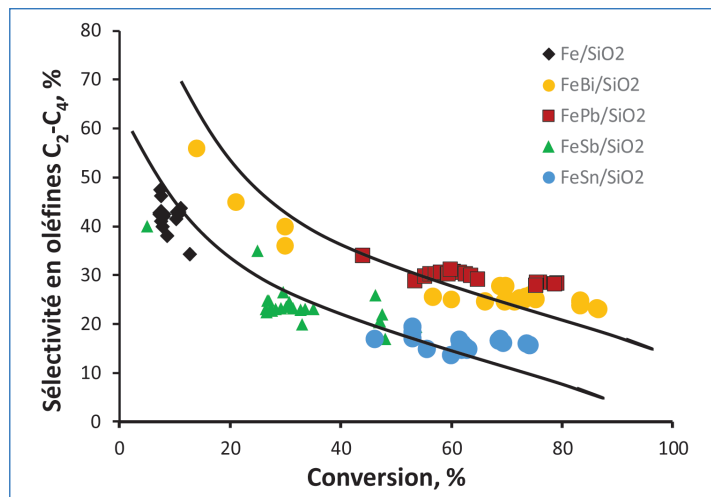


Figure 6 - Sélectivité des oléfines légères pour les catalyseurs promus par Bi, Pb, Sn et Sb à différentes conversions de CO.

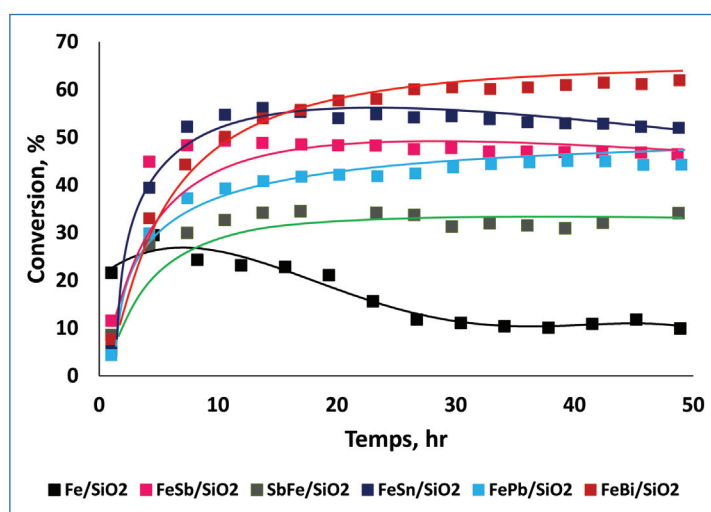


Figure 7 - Conversion du CO en fonction du temps pour les catalyseurs de fer promus avec Sn, Sb, Bi et Pb.

réaction Fischer-Tropsch, tandis que la sélectivité en oléfines légères n'est pas très affectée [27] (figure 6). D'autre part, la promotion avec le bismuth et le plomb conduit aussi bien à l'augmentation de la vitesse de réaction Fischer-Tropsch qu'à l'augmentation de la sélectivité en oléfines légères (atteignant presque 60 %). Cette amélioration de la performance catalytique a été attribuée au contact étroit des promoteurs avec les carbures de fer, qui pourrait faciliter la dissociation du CO et améliorer la carburation et la réductibilité du fer [28].

Une autre caractéristique importante à prendre en compte est la stabilité du catalyseur. Sa désactivation entraîne une perte de l'activité catalytique au cours du temps, une baisse de la productivité et la nécessité de son remplacement, son recyclage ou sa régénération. Les catalyseurs de fer promus avec les métaux mobiles ont atteint des conversions de CO stables après 10 h de réaction et ne présentent pas de désactivation après 50 h de fonctionnement (figure 7). Cette meilleure stabilité des catalyseurs à base de fer et des promoteurs Sn, Sb, Bi et Pb a été attribuée à un frittage moins important du fer [25].

Les travaux du laboratoire UCCS du CNRS et de l'Institut Centrale Lille dans le cadre du projet PSYCHE se sont principalement concentrés sur les catalyseurs de fer promus par le bismuth. En raison de leur toxicité, les catalyseurs contenant

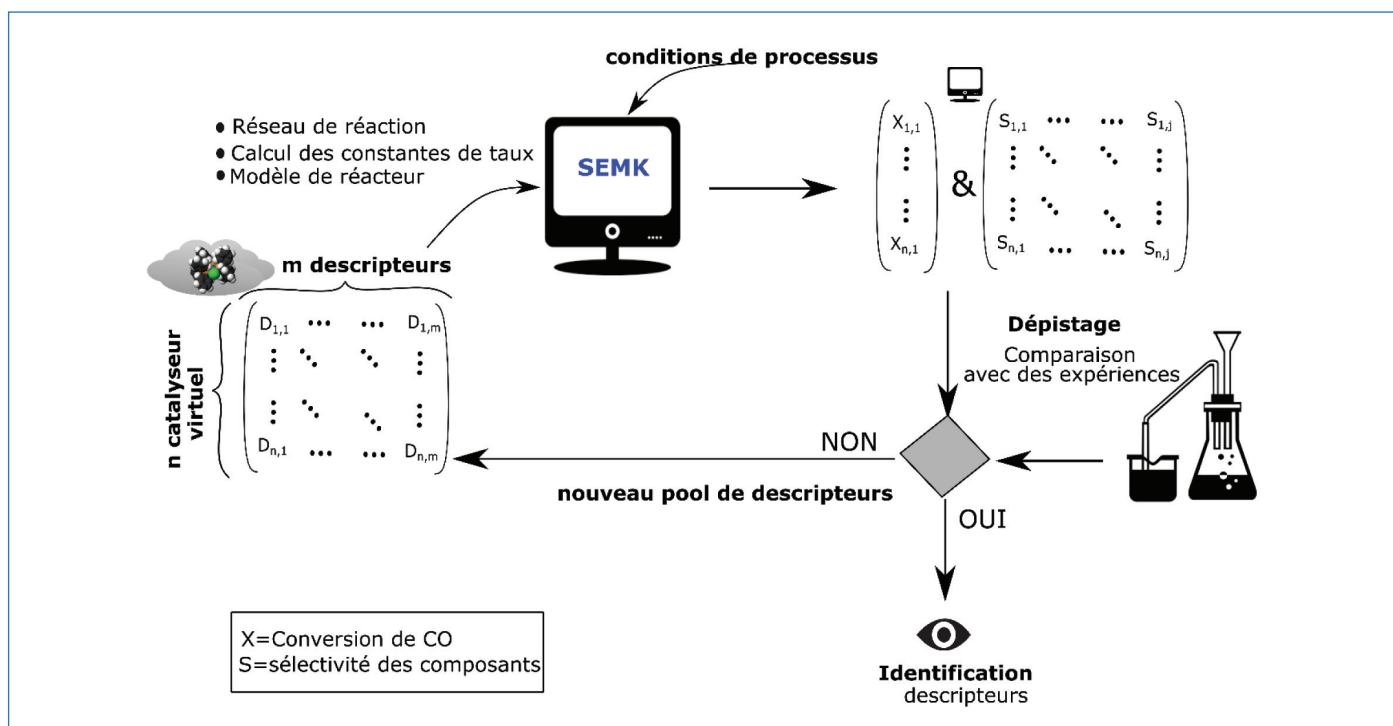


Figure 8 - Identification des descripteurs de catalyseurs durant la simulation SEMK, expliquant les résultats expérimentaux pour une production améliorée d'oléfines légères.

du plomb et de l'antimoine sont principalement considérés à titre de comparaison.

Le développement de ces nouveaux catalyseurs et les procédés pour la production d'oléfines légères reposent également sur une modélisation cinétique appropriée. La méthodologie SEMK (« single-event microkinetic ») utilisée dans le cadre du projet PSYCHE est un outil polyvalent permettant d'évaluer des réseaux réactionnels complexes englobant des séries homologues d'hydrocarbures, idéalement adapté à la synthèse Fischer-Tropsch catalysée par des métaux. Nous utilisons la capacité du modèle SEMK via une approche de catalyseur virtuel afin de déterminer les effets du promoteur sur sa performance en synthèse Fischer Tropsch (figure 8).

Une version étendue de la méthodologie SEMK utilisant une bibliothèque de catalyseurs virtuels basée sur la simulation nous a permis de déterminer les descripteurs de catalyseurs [29]. La simulation est comparée à l'activité expérimentale (avec des catalyseurs modèles) [30], ainsi qu'à la sélectivité en oléfines légères.

En accord avec les hypothèses du SEMK, seuls les descripteurs catalytiques – c'est-à-dire les enthalpies de chimisorption atomique de l'hydrogène Q_H , du carbone Q_C et de l'oxygène Q_O (tous dans la phase carbure) – sont autorisés à varier lors de l'évaluation des effets du promoteur (tableau II).

Tableau II - Enthalpies de chimisorption atomique de l'hydrogène, du carbone et de l'oxygène pour les catalyseurs Fe/CNT, FeBi/CNT et FePb/CNT.

Enthalpies de chimisorption atomique	Fe/CNT (kJ/mol)	FeBi/CNT (kJ/mol)	FePb/CNT (kJ/mol)
QH (Fe _x C-H)	249	247	248
QC (Fe _x C-C)	644	630	640
QO (Fe _x C-O)	601	588	578

PSYCHE, un pari gagnant ?

Nous considérons la technologie élaborée dans le cadre du projet PSYCHE comme la plus susceptible de remettre en question les technologies conventionnelles. Cette technologie offre d'un part des procédés innovants pour le prétraitement, la gazéification de différents flux de déchets plastiques, l'épuration du gaz de synthèse, et d'autre part des catalyseurs sélectifs de transformation catalytique du gaz de synthèse en oléfines légères par la réaction Fischer-Tropsch. Le savoir-faire généré dans ce projet est transféré à des entreprises en France et en Belgique avec l'aide des pôles de compétitivité Catalisti, Greenwin et Euramaterials et le Conseil consultatif de PSYCHE composé de plus de dix-sept entreprises.

Les auteurs remercient le Fonds européen de développement régional (FEDER) via le projet PSYCHE (Interreg France-Wallonie-Vlaanderen) pour leur soutien financier, avec le cofinancement des provinces de Flandre orientale et occidentale, de la région wallonne et du SPW/DGO6 (Économie, Emploi, Recherche).

[1] P.M. Subramanian, Plastics recycling and waste management in the US, *Resour. Conserv. Recycl.*, **2000**, 28(3-4), p. 253-263.

[2] PlasticsEurope (PEMRG); www.statista.com/statistics/282732/global-production-of-plastics-since-1950

[3] Y. Richardson, J. Blin, A. Julbe, A short overview on purification and conditioning of syngas produced by biomass gasification: catalytic strategies, process intensification and new concepts, *Prog. Energy Combust. Sci.*, **2012**, 38(6), p. 765-781.

[4] R. Siddique, J. Khatib, I. Kaur, Use of recycled plastic in concrete: a review, *Waste Manag.*, **2008**, 28(10), p. 1835-52.

[5] F. Pinto, C. Franco, R.N. André, M. Miranda, I. Gulyurtlu, I. Cabrita, Co-gasification study of biomass mixed with plastic wastes, *Fuel*, **2002**, 81(3), p. 291-297.

[6] S. Consonni, F. Viganò, Waste gasification vs. conventional waste-to-energy: a comparative evaluation of two commercial technologies, *Waste Manag.*, **2012**, 32(4), p. 653-666.

[7] A. Erkiaga, G. Lopez, M. Amutio, J. Bilbao, M. Olazar, Syngas from steam gasification of polyethylene in a conical spouted bed reactor, *Fuel*, **2013**, 109, p. 461-469.

[8] J.-W. Kim, T.-Y. Mun, J.-O. Kim, J.-S. Kim, Air gasification of mixed plastic wastes using a two-stage gasifier for the production of producer gas with low T_{tr} and a high calorific value, *Fuel*, **2011**, 90(6), p. 2266-72.

- [9] A. Prakash, On the effects of syngas composition and water-gas-shift reaction rate on Ft synthesis over iron based catalyst in a slurry reactor, *Chem. Eng. Commun.*, **1994**, 128(1), p. 143-158.
- [10] J. De Wilde, A. de Broqueville, Rotating fluidized beds in a static geometry: experimental proof of concept, *AIChE J.*, **2007**, 53(4), p. 793-810.
- [11] L.A. Vandewalle, A. Gonzalez-Quiroga, P. Perreault, K.M. Van Geem, G.B. Marin, Process intensification in a gas-solid vortex unit: computational fluid dynamics model based analysis and design, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **2019**, 58(28), p. 12751-765.
- [12] J. Sancho, J. Toledo, P. Aznar, Catalytic air gasification of plastic waste (polypropylene) in fluidized bed. Part I: Use of in-gasifier bed additives, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **2008**, 47, p. 1005-10.
- [13] V. Wilk, H. Hofbauer, Conversion of mixed plastic wastes in a dual fluidized bed steam gasifier, *Fuel*, **2013**, 107, p. 787-799.
- [14] L. Devi, K.J. Ptasiński, F.J.J.G. Janssen, A review of the primary measures for tar elimination in biomass gasification processes, **2003**, 24, p. 125-140.
- [15] D. Chiche, C. Diverchy, A. Lucquin, F. Porcheron, F. Defoort, Synthesis gas purification, *Oil Gas Sci. Technol.*, **2013**, 68(4), p. 707-723.
- [16] E. Van Eygen, D. Laner, J. Fellner, Circular economy of plastic packaging: current practice and perspectives in Austria, *Waste Manag.*, **2018**, 72, p. 55-64.
- [17] S. Ügdüler, K.M. Van Geem, M. Roosen, E.I.P. Delbeke, S. De Meester, Challenges and opportunities of solvent-based additive extraction methods for plastic recycling, *Waste Manag.*, **2020**, 104, p. 148-182.
- [18] H. Chen, T. Namioka, K. Yoshikawa, Characteristics of tar, NO_x precursors and their absorption performance with different scrubbing solvents during the pyrolysis of sewage sludge, *Appl. Energy*, **2011**, 88(12), p. 5032-41.
- [19] H.M. Torres Galvis, K.P. De Jong, Catalysts for production of lower olefins from synthesis Ggas: a review, *ACS Catal.*, **2013**, 3(9), p. 2130-49.
- [20] A. Corma, F.V. Melo, L. Sauvanaud, F. Ortega, Light cracked naphtha processing: controlling chemistry for maximum propylene production, *Catal. Today*, **2005**, 107-108, p. 699-706.
- [21] P. Tian, Y. Wei, M. Ye, Z. Liu, Methanol to olefins (MTO): from fundamentals to commercialization, *ACS Catal.*, **2015**, 5(3), p. 1922-38.
- [22] F. Jiao, J. Li, X. Pan, J. Xiao, H. Li *et al.*, Selective conversion of syngas to light olefins, *Science*, **2016**, 351(6277), p. 1065-68.
- [23] K. Cheng, B. Gu, X. Liu, J. Kang, Q. Zhang, Y. Wang, Direct and highly selective conversion of synthesis gas into lower olefins: design of a bifunctional catalyst combining methanol synthesis and carbon-carbon coupling, *Angew. Chemie Int. Ed.*, **2016**, 55(15), p. 4725-28.
- [24] V.V. Ordonsky, Y. Luo, B. Gu, A. Carvalho, P.A. Chernavskii, K. Cheng, A.Y. Khodakov, Soldering of iron catalysts for direct synthesis of light olefins from syngas under mild reaction conditions, *ACS Catal.*, **2017**, 7(10), p. 6445-52.
- [25] A.J. Barrios, A.Y. Khodakov *et al.*, Identification of efficient promoters and selectivity trends in high temperature Fischer-Tropsch synthesis over supported iron catalysts, *Appl. Catal. B Environ.*, **2020**, 273, 119028.
- [26] B. Gu, E. Marceau, V.V. Ordonsky, A.Y. Khodakov *et al.*, Mobility and versatility of the liquid bismuth promoter in the working iron catalysts for light olefin synthesis from syngas, *Chem. Sci.*, **2020**, 11, p. 6167-82.
- [27] D.V. Peron, A.J. Barrios, A. Taschin, I. Dugulan, A.Y. Khodakov *et al.*, Active phases for high temperature Fischer-Tropsch synthesis in the silica supported iron catalysts promoted with antimony and tin, *Appl. Catal. B Environ.*, **2021**, 292, 120141.
- [28] V.V. Ordonsky, Y. Luo, B. Gu, A. Carvalho, P.A. Chernavskii, K. Cheng, A.Y. Khodakov, Soldering of iron catalysts for direct synthesis of light olefins from syngas under mild reaction conditions, *ACS Catal.*, **2017**, 7(10), p. 6445-52.
- [29] A. Chakkingal, L. Pirro, A.R. Costa da Cruz, A.J. Barrios, M. Virginie, A.Y. Khodakov, J.W. Thybaut, Unravelling the influence of catalyst properties on light olefin production via Fischer-Tropsch synthesis: a descriptor space investigation using single-event microkinetics, *Chem. Eng. J.*, **2021**, 419, 129633.
- [30] B. Gu, V.V. Ordonsky, M. Bahri, O. Ersen, P.A. Chernavskii, D. Filimonov, A.Y. Khodakov, Effects of the promotion with bismuth and lead on direct synthesis of light olefins from syngas over carbon nanotube supported iron catalysts, *Appl. Catal. B Environ.*, **2018**, 234, p. 153-166.

Alan J. BARRIOS^{a,b}, doctorant, **Anoop CHAKKINGAL**^{a,b}, doctorant, **Deizi V. PERON**^a, postdoctorante, **Mirella VIRGINIE**^a, maître de conférences, **Robert WOJCIESZAK**^a, chargé de recherches, **Elisabeth DELBEKE**^b, coordinatrice « Chimie durable », **Kevin M. VAN GEEM**^b, professeur, **Joris THYBAUT**^b, professeur, et **Andrei Y. KHODAKOV**^{*a}, directeur de recherche.

^aUniversité de Lille, CNRS, Centrale Lille, Université d'Artois, Unité de Catalyse et Chimie du Solide (UCCS), Lille.

^bLaboratory for Chemical Technology (LCT), Department of Materials, Textiles and Chemical Engineering, Ghent University, Ghent (Belgique).

* andrei.khodakov@univ-lille.fr



50 ANS
DU GROUPE FRANÇAIS
DES POLYMÈRES

15 - 19 Novembre 2021

7 sessions de conférences + 3 sessions poster

- 1) Ingénierie macromoléculaire: chimie et procédés
- 2) Physique des polymères, physique avec des polymères
- 3) Polymères pour la santé
- 4) Polymères pour la transition énergétique
- 5) Polymères et environnement
- 6) Polymères et industrie
- 7) Histoire(s) des polymères: 50 ans du GFP

**CONGRES
EN FORMAT VIRTUEL**

Inscrivez vous !!!

<http://gfp2021.univ-lyon1.fr/fr>