

Le recyclage des plastiques de déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE)

Tri et compatibilisation des matières

Résumé Les technologies actuelles de tri spectroscopique industriel des plastiques comme le proche infrarouge sont inefficaces sur des plastiques de couleurs sombres. Cela est dû au pigment actuellement utilisé, à la fois pour limiter le vieillissement de ces matières et colorer le matériau : le noir de carbone. Ces plastiques, qui représentent une grande majorité des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE), sont donc difficilement recyclables et recyclés puisque des plastiques de natures différentes ne peuvent se mélanger facilement. Cet article s'intéresse aux fondamentaux d'une nouvelle technologie de tri industriel pouvant surpasser cet obstacle : l'imagerie hyperspectrale en moyen infrarouge (HSI-MIR). Cependant, même si une nouvelle technologie révolutionne le marché, des puretés à 100 % seront impossibles à atteindre. L'impact de quelques pourcents d'impuretés sur la qualité des plastiques recyclés dans le cas particulier des DEEE est ainsi étudié.

Mots-clés **Recyclage, plastiques, polymères, spectroscopie infrarouge, DEEE, compatibilisation.**

Abstract **Recycling plastics from waste electrical and electronic equipment (WEEE): materials sorting and compatibilization**

Current industrial plastics spectroscopic sorting technologies such as near infrared are ineffective on dark colored plastics. This is due to the pigment currently used to limit the ageing of these materials and to color them: carbon black. These plastics, which represent the vast majority of waste electrical and electronic equipment (WEEE), are therefore impossible to recycle and are difficult to recycle since plastics of different types cannot be mixed easily. This article is about the fundamentals of a new industrial sorting technology, which could overcome this issue: mid-infrared hyperspectral imagery (MIR-HSI). However, even if a new technology revolutionizes the market, 100% purities will still be out of reach. Thus the impact of a few percent of impurities on the quality of recycled plastics, in the specific case of plastics commonly found in WEEE, is studied.

Keywords **Recycling, plastics, polymers, infrared spectroscopy, WEEE, compatibilization.**

Les difficultés du recyclage des plastiques de DEEE

Nos travaux se sont intéressés à la recyclabilité des plastiques de déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE ou D3E) et plus accessoirement à ceux de véhicules hors d'usage (VHU). Ces déchets sont issus des parties en plastiques rigides de nos télévisions, ordinateurs, smartphones, imprimantes, mais aussi réfrigérateurs, machines à laver, cafetières, etc., formant très fréquemment « l'habillage » de ces appareils. Les parties souples, comme les gaines de câbles électriques ou les boutons des télécommandes, sont des élastomères, terme plus général et technique que « caoutchouc ». Ces élastomères étant difficiles à faire fondre dans des conditions classiques, leur recyclage classique, dit « recyclage mécanique » est impossible ; leur étude est donc un tout autre sujet.

Pour les VHU, sont concernées un certain nombre de pièces d'intérieur (tableau de bord, intérieur de portes, tous types de caches...), sous capot (conduites en polyamides) et également certaines pièces d'habillage extérieur (carter de rétroviseur, essuie-glaces) et même les pare-chocs.

Quel semble être le principal point commun de tous ces plastiques ? La majorité d'entre eux sont de couleur sombre, fréquemment noire. Le problème est que le pigment le plus utilisé pour obtenir ces teintes est le noir de carbone. Même à moins de 0,1 % [1], cet additif a tendance malheureusement à « aveugler » les caméras spéciales utilisées pour trier les plastiques en vue de leur recyclage. Les plastiques sont en effet de natures nombreuses et variées – PEBD, PEHD, PET, PS,



PVC, etc. – et la majorité d'entre eux sont dits « incompatibles » [2]. Cela signifie que leurs mélanges mènent à des propriétés médiocres, en particulier du point de vue de leur résistance mécanique. En conclusion, en plus d'être séparés des autres matériaux (métaux, verre, papier, carton...), les plastiques doivent être triés selon leurs natures.

De nombreuses technologies de tri industriel existent selon le type de matériaux à trier, comme les trommels, la flottaison, les courants de Foucault, les overbands, etc. [3]. Pour les plastiques, le tri par imagerie hyperspectrale en proche infrarouge (NIR-HSI : « near-infrared hyperspectral imagery »)⁽¹⁾

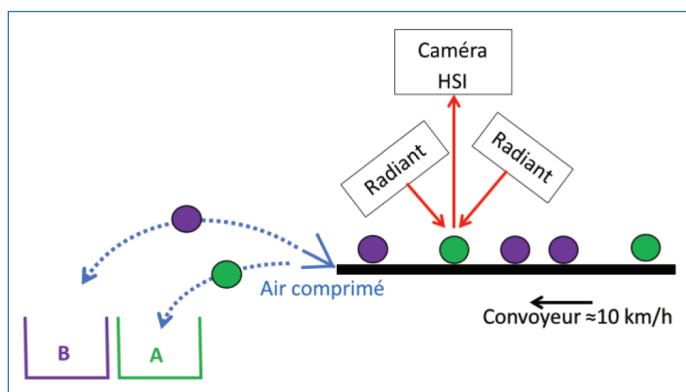


Figure 1 - Principe de fonctionnement d'un tri optique.

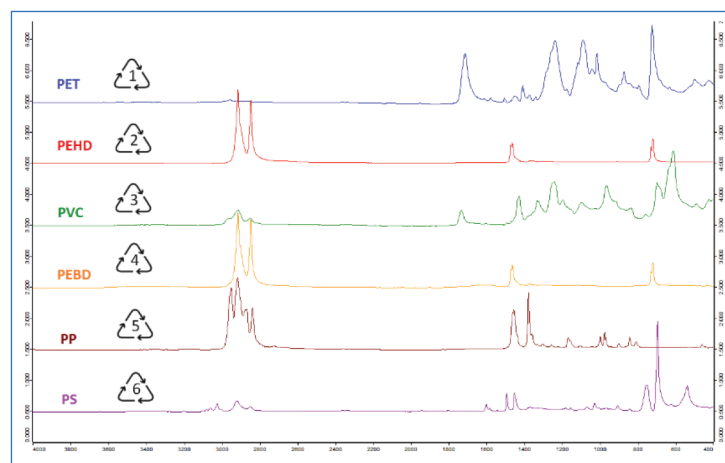


Figure 2 - Exemple de spectres en moyen infrarouge de plastiques courants.

est une technologie centrale qui permet de discriminer finement les natures de matières selon leur « signature » spectrale en proche infrarouge [1].

Comme illustrée sur la *figure 1*, une ligne de tri NIR-HSI consiste en un tapis convoyeur de plus d'un mètre de large, allant typiquement entre 3 et 10 km/h, sur lequel sont répartis des objets de taille réduite. Juste après un barreau de radiants, émettant ici en proche infrarouge, une caméra dite hyperspectrale fait l'acquisition d'images où chaque pixel est accompagné d'un spectre. Après traitement et identification, des buses alimentées en air comprimé permettent une éjection de certaines natures de polymères vers un bac particulier ; les autres poursuivent leur trajectoire balistique.

Aujourd'hui, les « flux » de DEEE et de VHU sont plutôt bien développés en raison de l'aspect assez polluant de ces déchets et de la forte valorisation possible des autres matériaux les constituant, très principalement les métaux, en particulier les métaux précieux en ce qui concerne les DEEE. Faute de débouchés, le tri des plastiques – étape primordiale pour une valorisation de qualité – reste encore limité.

D'après un rapport de l'ADEME de 2019 [4], les plastiques représenteraient 18 % des presque 800 000 tonnes de DEEE collectées en France en 2018 (pour 1,9 million de tonnes de produits commercialisés dans la même année), soit 144 000 tonnes de plastiques de DEEE français par an. Pour les VHU, il a été estimé en 2017 qu'un véhicule comporte 150 kg de plastiques [5]. Puisque 1,3 million de VHU sont produits en France annuellement en 2021 [6], le total s'élèverait à 195 000 tonnes de plastiques de VHU. Les plastiques de DEEE et de VHU représenteraient par conséquent près de 339 000 tonnes annuelles en France !

Il est donc important d'aider à la valorisation de ces déchets. Pour cela, il faut que les matériaux obtenus après recyclage soient de qualité intéressante et à des coûts abordables, ce qui signifie un meilleur tri de ces matières en fonction de leurs natures. Il peut être aussi nécessaire que des additifs soient ajoutés pour se rapprocher encore plus des matières vierges. C'est dans ces objectifs que notre laboratoire a travaillé sur la spectroscopie moyen infrarouge vis-à-vis du tri, puis sur des stratégies de compatibilisation entre l'acrylonitrile butadiène styrène (ABS) et le polypropylène (PP), deux constituants majeurs des DEEE.

Une nouvelle (vieille) technologie pour voir dans le (plastique) noir

Plusieurs technologies ont été proposées et sont aujourd'hui en développement pour pouvoir analyser et trier des

plastiques sombres comme la spectroscopie Raman [7], le LIBS (« laser induced breakdown spectroscopy ») [8] ou encore les térahertz [9]. L'imagerie hyperspectrale en moyen infrarouge (MIR-HSI)⁽¹⁾ a été choisie car des modèles abordables de caméras commencent à entrer sur le marché.

Le moyen infrarouge est depuis longtemps utilisé en laboratoire pour la caractérisation de nombreux produits organiques, dont les polymères. Cette technologie est basée sur l'absorption de faisceaux infrarouges par les composés selon les modes de vibration de leurs liaisons covalentes ; elle est donc théoriquement capable de distinguer des polymères.

L'appareil le plus fréquemment rencontré est le spectroscope infrarouge à transformée de Fourier (IRTF, ou FTIR en anglais). La *figure 2* montre des spectres obtenus pour les principaux types de plastiques. Cependant, les caméras MIR-HSI sont fortement limitées en termes de gammes de longueurs d'ondes visibles, de résolution spectrale et de signal sur bruit en comparaison aux appareils FTIR de laboratoire. En effet, une analyse laboratoire sur un seul « spot » peut prendre plusieurs secondes là où une analyse industrielle doit se réaliser sur plusieurs objets à environ 10 km/h, à distance et en quelques millisecondes pour assurer le rendement machine. Des essais préliminaires de dégradation artificielle des conditions d'acquisition en FTIR ont été réalisés pour évaluer l'impact d'une résolution et d'un temps d'acquisition dégradés. Sans surprise, ils ont montré qu'un temps d'acquisition réduit amène à la diminution du rapport signal/bruit, amenant des signaux de faible amplitude à disparaître. Également, la dégradation de résolution spectrale amène des signaux proches à se confondre progressivement et des signaux faibles à « se fondre » dans la ligne de base comme montré sur la *figure 3*.

Nos travaux de recherche se sont donc concentrés sur un inventaire de tous les signaux distinctifs d'une vingtaine de polymères, parfois de natures très proches, afin de mettre en évidence les risques de confusion et les signaux importants pour la discrimination des natures de polymères.

Il existe de nombreuses tables de corrélation pour la spectroscopie infrarouge ; elles référencent des types de vibrations moléculaires en fonction du nombre d'ondes, et donc les liaisons covalentes associées. L'idée centrale de nos travaux a été de créer des tables de corrélation spécifiques à des natures de polymères.

Ainsi, chaque ligne du tableau de la *figure 4* correspond à une nature, et chaque colonne à une plage de nombre d'ondes de 10 cm^{-1} . Pour simplifier le tableau et le garder relativement

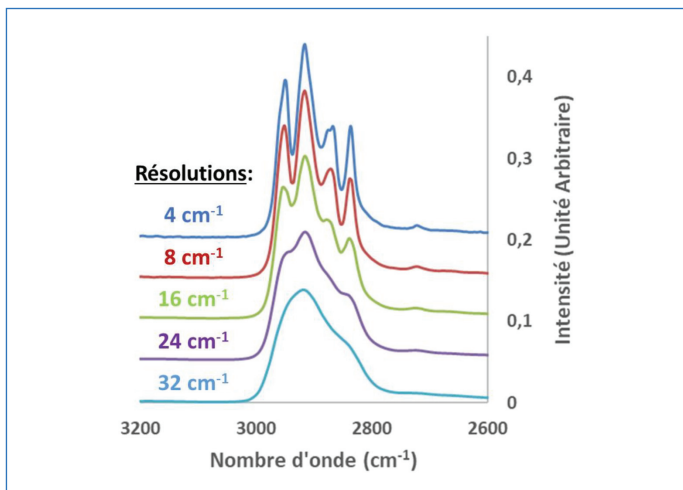


Figure 3 - Effet de la baisse de résolution sur des spectres FTIR de polypropylène.

compact, aucune colonne vide n'a été créée. Il n'y a donc aucune colonne entre 2 840 et 2 370 cm^{-1} puisqu'aucun signal significatif n'a été observé sur l'ensemble des spectres considérés. Ce regroupement à 10 cm^{-1} par colonne simule en quelque sorte une résolution de 10 cm^{-1} . Si la résolution se retrouve encore moins bonne, il suffit alors de fusionner les colonnes. Finalement, les limites en nombre d'ondes de ces tableaux ont été choisies pour correspondre aux gammes spectrales des différentes caméras MIR-HSI existant sur le marché.

Les couleurs des cases correspondent arbitrairement à des intensités relatives vis-à-vis du signal le plus intense de la gamme considérée pour le spectre considéré. Ainsi, le rouge du polyéthylène (PE) entre 2 000 et 3 000 cm^{-1} n'est comparable ni au rouge du PP dans cette gamme, ni au rouge du PE entre 700 et 1 500 cm^{-1} . Le jaune, l'orange et le rouge correspondent respectivement à « faible/f », « moyen/m » et « fort/F » qui sont fréquemment trouvés dans les tables de corrélation. Le bleu indique ici que l'intensité est variable selon les conditions.

À l'aide de ces tableaux, les signaux caractéristiques d'une matière sont rapidement identifiables par le fait que les colonnes les contenant sont vides. Par exemple, la colonne

à 2 840 cm^{-1} correspond uniquement au polypropylène, bien que le signal soit faible.

Prévus initialement comme support de base à des algorithmes d'identification en vue d'un tri industriel, ces tableaux se sont aussi révélés très utiles en laboratoire. Ils permettent d'identifier rapidement des matrices polymères, mais également des « faux-amis » en repérant des signaux parasites indiquant en réalité un alliage ou un additif. Ainsi, les signaux de la calcite et du talc ont été rencontrés presque systématiquement dans des échantillons de déchets réels identifiés comme PE ou PP. Ces travaux ont démontré que la MIR-HSI est théoriquement capable de trier des plastiques de couleur sombre, contrairement à la NIR-HSI. Les points forts et points faibles de cette technologie ont été évalués et des outils ont été développés afin d'aider son utilisation, « manuelle » ou automatisée en vue de son application industrielle. Cependant, on ne peut pas s'attendre à des puretés de 100 %, même après plusieurs années de développement technologique, à la fois pour des raisons fondamentales (limites spectroscopiques) comme techniques (besoin de cadence).

Marier des plastiques qui ne se supportent pas

Les impuretés ayant subsisté après tri industriel peuvent malheureusement porter atteinte aux propriétés mécaniques. Nous allons nous intéresser spécifiquement au cas de l'ABS contenant des impuretés de PP, puisque les plastiques de DEEE contiennent principalement de l'ABS, de l'HIPS (polystyrène choc) et du PP [10]. Plusieurs études ont déjà porté sur des mélanges ABS/HIPS [11], mais il est probable qu'une incompatibilité plus forte soit présente entre ABS et PP en raison de leurs natures chimiques différentes, comme pour le cas HIPS/PP [12].

En première partie, des quantités grandissantes de PP ont été ajoutées à de l'ABS en extrusion afin de déterminer quel taux d'impuretés maximal pouvait être considéré comme acceptable et donc servir comme objectif à atteindre pour une machine de tri. L'étude a été réalisée sur des échantillons vierges afin de ne pas accumuler des sources d'effets.

Les propriétés au choc Charpy entaillé ont montré une baisse significative des propriétés dès les plus petits pourcentages

Polymère	3300	3080	3070	3060	3025	2995	2965	2950	2930	2920	2870	2860	2850	2840	2370	2340	2240
PE, EVA, PEX										2915			2847				
PP								2950		2916	2867			2837			
PVC							2964			2912			2850				
HIPS		3081		3059	3025					2920			2848				
ABS		3084		3060	3026					2922			2850				2237
ABS-PC				3060	3027		2967		2927	2872		2851					2237
PC							2968		2932		2872						
PET							2960			2932			2851				
PMMA						2993		2950					2847				
PA6, PA66	3296		3073						2932			2860					
CO ₂																	

Figure 4 - Extrait d'une table de corrélation polymères/signaux MIR.

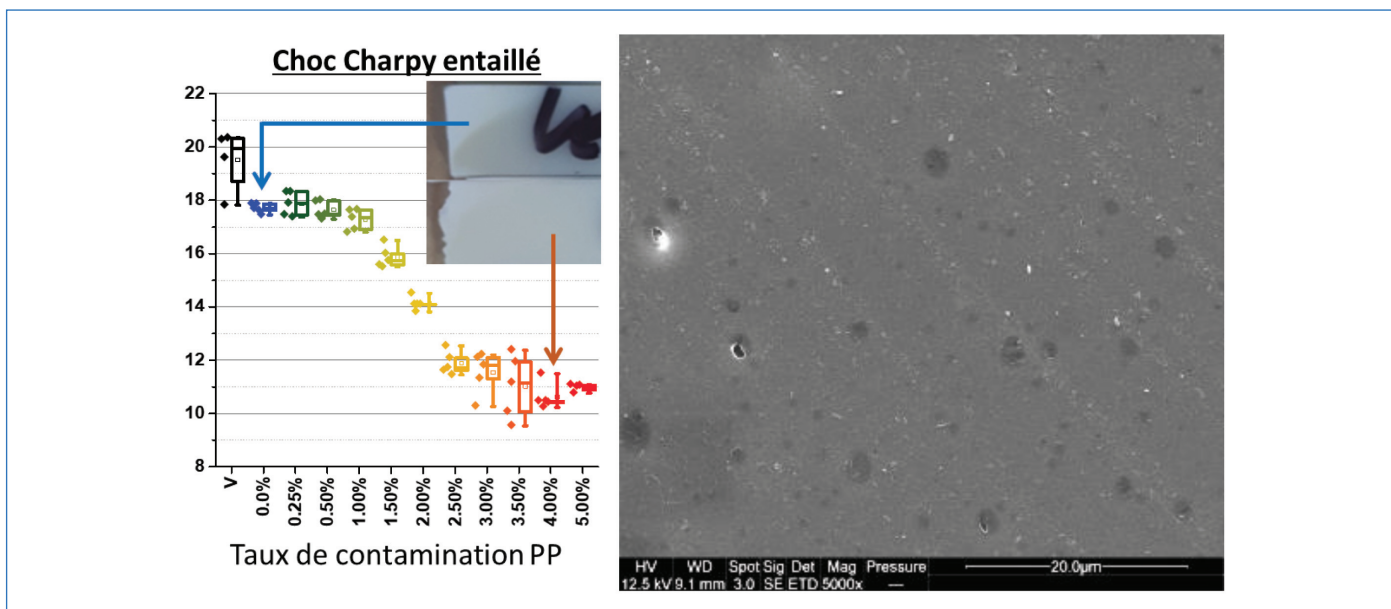


Figure 5 - Effets de la présence de PP dans de l'ABS : à gauche, les résultats de choc Charpy entaillé ; à droite, 4% de PP sous forme de nodules (taches sombres) dans de l'ABS (observation MEB sur échantillon ultracycrotomé).

d'insertion comme visible sur la gauche de la figure 5. On note qu'elles atteignent un minimum à 4 % de PP et qu'elles avaient déjà baissé de moitié à 2 %. Des analyses au microscope électronique à balayage (MEB) montrent que le PP s'organise sous forme nodulaire et que la taille mais surtout la concentration des nodules augmentent avec le pourcentage de PP. Ces nodules présentant peu de cohésion avec la matrice ABS, ils forment des points faibles où la fissuration peut s'initier ou se propager rapidement, fragilisant considérablement le matériau dans sa globalité.

Des taux d'impuretés inférieurs à 4 % paraissent difficiles à atteindre pour des machines de tri industriel [1] ; il est donc nécessaire d'utiliser des « compatibilisants ». Des essais ont été réalisés sur sept candidats à la compatibilisation.

Les espèces chimiques choisies sont toutes de nature amphiphile, comme pour les tensioactifs. Là où un tensioactif présente une fonctionnalité hydrophile et une autre lipophile, ces composants vont présenter une partie ayant des « affinités » avec la matrice, ici l'ABS, et une partie ayant des « affinités » avec l'impureté, ici le PP. Ces « affinités » reposent très principalement sur des principes de polarités (apolarité pour le PP) et d'aromaticité (pour l'ABS et les styréniques en général). Théoriquement, le meilleur compatibilisant entre un polymère A et un polymère B est donc un copolymère bloc A-B ou un polymère A greffé avec des chaînes de B. Le rôle de ces compatibilisants va donc être de réduire la taille de la phase dispersée, mais également de renforcer la cohésion interfaciale. Ce manque de cohésion est fréquemment le « maillon faible » sous sollicitation et va donc provoquer des ruptures prématurées. Également, une taille plus faible de nodules sera favorable à la dissipation des contraintes au sein du matériau.

Parmi les candidats à la compatibilisation choisis, certains présentent également des propriétés élastomériques ; ils peuvent donc jouer le rôle de « modificateur d'impact » et ainsi améliorer les propriétés finales sans avoir à améliorer la compatibilité entre matériaux.

Les résultats se sont révélés probants pour un simple ajout de l'ordre du pourcent de SEBS (styrène-éthylène-butylène-styrène) ou de PP-g-MA (polypropylène greffé anhydride

maléique), avec une récupération totale des performances. Dans le SEBS, on peut s'attendre à ce que les parties styrène soient compatibles avec l'ABS et les parties éthylène-butylène avec le PP, et dans le PP-g-MA, à ce que la partie anhydride maléique présente une certaine affinité avec les groupements nitriles de l'ABS.

Ces deux candidats se sont révélés les plus intéressants puisqu'ils sont assez courants sur le marché, en particulier le PP-g-MA, contrairement aux autres. Le SEBS étant un agent d'impact, il a également permis d'améliorer les propriétés au-delà de celles de l'ABS vierge, comme on peut le voir sur la figure 6. Il a également été vérifié que cela n'avait pas d'incidence sur les autres propriétés mécaniques, en particulier le module d'Young (rigidité).

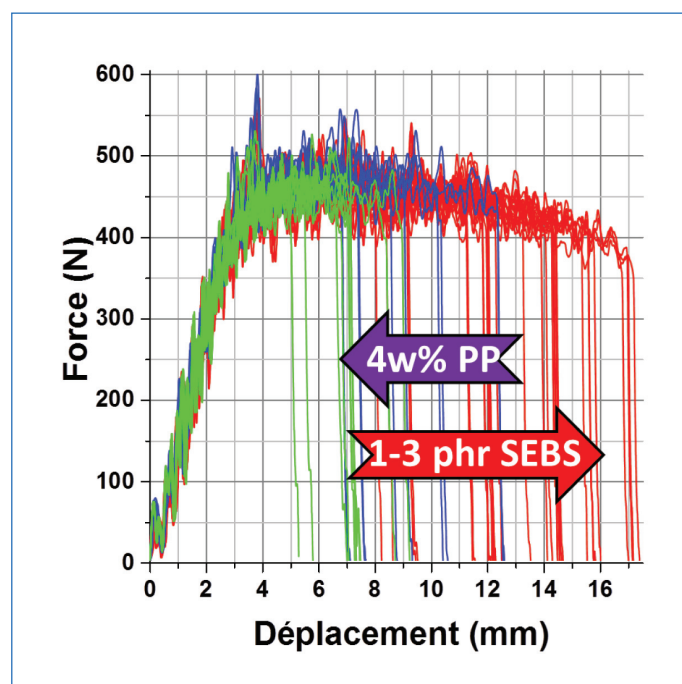


Figure 6 - Essai de choc Charpy instrumenté sur éprouvette non entaillée : en bleu, les essais sur de l'ABS vierge ayant subi la même extrusion ; en vert, les essais sur de l'ABS contaminé à 4 % de PP ; en rouge, de l'ABS contaminé à 4 % de PP et additivé en SEBS.

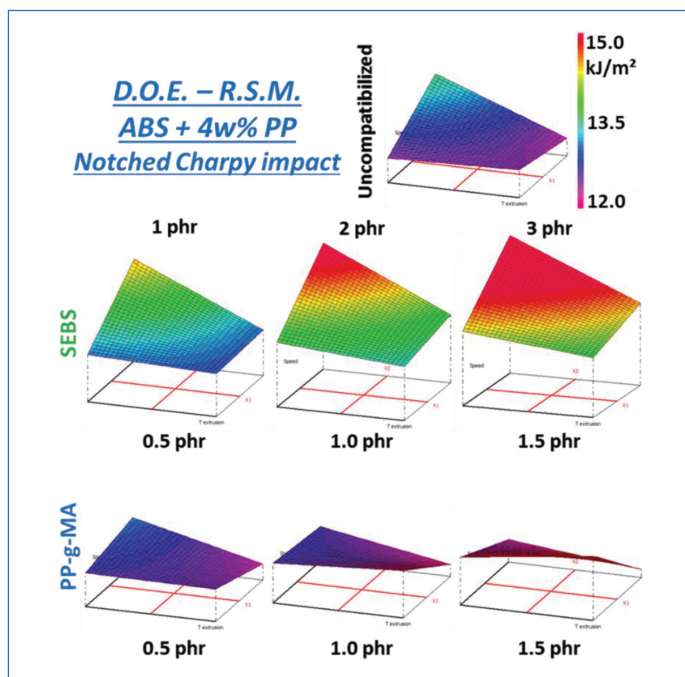


Figure 7 - Plans d'expériences avec méthodologie de surface de réponse (DOE-RSM) sur des systèmes ABS contaminés à 4 % de PP. Effet des vitesses et températures d'extrusion, des compatibilisants utilisés et leur taux d'incorporation.

Après cette sélection, une méthodologie de stratégie expérimentale par plans d'expériences a été appliquée afin d'optimiser les paramètres d'extrusion appliqués ainsi que les taux d'ajout des additifs à travers une modélisation des réponses observées, ici la résistance au choc Charpy. Une méthodologie de surface de réponse (RSM en anglais) est appliquée pour mieux appréhender ces résultats. La température d'extrusion, la vitesse de vis et le taux d'ajout ont été les trois paramètres observés.

La figure 7 montre ces surfaces de réponse avec une augmentation de la vitesse d'extrusion en allant vers l'arrière des tracés, et une augmentation de la température en allant sur la droite. On observe donc une amélioration non négligeable des propriétés d'un système ABS contaminé PP mais non compatibilisé en augmentant la vitesse de vis et en diminuant la température. Cela peut s'expliquer par un cisaillement plus important, qui va mieux disperser l'impureté, et une dégradation thermique modérée.

Les systèmes compatibilisés au SEBS présentent un même comportement avec une amélioration générale des propriétés, notamment avec le taux de SEBS qui joue son rôle de modificateur d'impact. Les systèmes au PP-g-MA dérivent de ce comportement et on observe que l'augmentation du taux semble avoir un effet néfaste. Il est très probable que ce compatibilisant soit ajouté en excès et que, paradoxalement, il joue à son tour le rôle d'impureté.

Il a donc été trouvé que des taux faibles de PP au sein de l'ABS entraînent déjà des pertes importantes de propriétés au choc. Cependant, l'utilisation de PP-g-MA ou de SEBS et une adaptation des paramètres d'extrusion permettent de compenser ces effets négatifs pour retrouver des propriétés proches du vierge, voire supérieures.

En résumé...

Ces travaux ont montré que l'utilisation de l'imagerie MIR-HSI pouvait théoriquement répondre à la problématique du tri

industriel des plastiques sombres trouvés en grandes quantités dans les DEEE (ABS, HIPS et PP principalement). Un inventaire de nombreuses natures de plastiques, de leurs additifs et de l'effet du vieillissement a été réalisé, donnant lieu à la création de tables de corrélation spectrale appliquée aux polymères. Ces éléments ont servi de preuve de concept et de base de développement pour des machines de tri industriel. Des travaux supplémentaires peuvent être réalisés pour élargir les bases de données, notamment avec des mélanges de polymères et différents additifs comme les retardateurs de flamme.

Il a été observé que les propriétés au choc de l'ABS sont extrêmement sensibles à la contamination par du PP qui se présente alors sous forme de nodules. Les puretés obtenues après tri automatisé ne pouvant être de 100 %, il paraît inévitable d'avoir à compatibiliser les matières afin d'obtenir des propriétés compétitives. Des candidats intéressants à la compatibilisation (SEBS et PP-g-MA) ont été sélectionnés. Il a également été mis en évidence le rôle primordial des conditions d'extrusion, ayant déjà un effet comparable aux additifs et surtout une interaction forte avec eux.

Ces travaux sont à étendre à des mélanges plus complexes (ABS-HIPS-PP) puis à essayer sur des gisements réels de déchets qui combinent également des problématiques de vieillissement et de différences de grades afin d'envisager une application industrielle.

Pour aller plus loin

Les travaux de spectroscopie présentés ici ont fait l'objet d'articles scientifiques traitant respectivement des polymères styréniques et leurs alliages [13], des polyoléfinés et polymères proches [14]; de l'impact du vieillissement sur la reconnaissance [15], de « l'altération spectrale », c'est-à-dire l'impact des paramètres d'acquisition et de la formulation, notamment le noir de carbone [16].

Une seconde thèse a été réalisée sur cette problématique (2017-2021), avec un point de vue mathématiques/informatique [17]. Ces travaux, intitulés « Traitement de données incertaines : application au tri des matières plastiques », abordent la question de l'algorithme de classification, élément clé du processus de tri industriel. Plusieurs articles en ont découlé [18-20].

Concernant les systèmes ABS/PP, l'ensemble des résultats de compatibilisation ainsi qu'une étude de modélisation en éléments finis du comportement mécanique de ce système ont été publiés dans la revue *Polymers* (MDPI) [21-22]. Enfin, un dernier article portant sur l'impact du vieillissement photochimique sur la recyclabilité de matériaux styréniques a été publié dans *Journal of Polymers and the Environment* [23].

Les travaux de thèse de Charles Signoret ont été réalisés au sein du C2MA (Centre des Matériaux des Mines d'Alès) sous la direction de Didier Perrin et Patrick Ienny. Intitulé « Valorisation de matières premières secondaires thermoplastiques issus de tri optique en ligne », ce projet de recherche a été réalisé en partenariat avec les entreprises Suez et Pellenc ST sous financement FUI (Fonds unique interministériel) attribué par BPI France. Les auteurs remercient Alexandre Cheron, Marie Edo, Benjamin Galard, Pierre Girard, Dominique Lafon, Agathe Le Guen, Robert Lorquet, Matthias Merle Mounier, Jean-Claude Roux et Arthur Tremeau pour leur participation à ces travaux, et plus généralement toute l'équipe du C2MA.

(1) MIR (« mid-infrared »), moyen infrarouge : 4 000-400 cm^{-1} ou 2,5-25,0 μm . NIR (« near-infrared ») : 12 500-4 000 cm^{-1} ou 0,8-2,5 μm /PIR : proche infrarouge.

[1] J. Beigbeder, D. Perrin, J.-F. Mascaro, J.-M. Lopez-Cuesta, Study of the physico-chemical properties of recycled polymers from waste electrical and electronic equipment (WEEE) sorted by high resolution near infrared devices, *Resour. Conserv. Recycl.*, **2013**, 78, p. 105-114.

[2] L.A. Utracki, *Polymer Blends Handbook*, Kluwer Academic Publishers, **2002**.

[3] S.P. Gundupalli, S. Hait, A. Thakur, A review on automated sorting of source-separated municipal solid waste for recycling, *Waste Manag.*, **2017**, 60, p. 56-74.

[4] E. Fangeat, A. Depouy, M. Jover, M. Borie, O. Tonsart, *Rapport annuel du registre des déchets d'équipements électriques et électroniques*, ADEME, **2019**, p. 1-112.

[5] A.H. Tullo, Plastics makers plot the future of the car, *Chem. Engineering News*, **2017**, <https://cen.acs.org/articles/95/i45/Plastics-makers-plot-future-car.html>

[6] Véhicules hors d'usage, Ministère de la Transition Ecologique, **2021**, www.ecologie.gouv.fr/vehicules-hors-dusage

[7] S.-B. Roh, S.-K. Oh, E.-K. Park, W.Z. Choi, Identification of black plastics realized with the aid of Raman spectroscopy and fuzzy radial basis function neural networks classifier, *J. Mater. Cycles Waste Manag.*, **2017**, 19, p. 1093-1105.

[8] V.C. Costa, F.W.B. Aquino, C.M. Paranhos, E.R. Pereira-Filho, Identification and classification of polymer e-waste using laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) and chemometric tools, *Polym. Test.*, **2017**, 59, p. 390-395.

[9] A. Küter, S. Reible, T. Geibig, D. Nüßler, N. Pohl, THz imaging for recycling of black plastics, *Tm - Tech. Mess.*, **2018**, 85, p. 191-201.

[10] E. Maris, P. Botané, P. Wavrer, D. Froelich, Characterizing plastics originating from WEEE: a case study in France, *Miner. Eng.*, **2015**, 76, p. 28-37.

[11] D. Hirayama, C. Saron, Morphologic and mechanical properties of blends from recycled acrylonitrile-butadiene-styrene and high-impact polystyrene, *Polym.*, **2018**, 135, p. 271-278.

[12] D. Perrin, O. Mantaux, P. Ienny, R. Léger, M. Dumon, J.-M. Lopez-Cuesta, Influence of impurities on the performances of HIPS recycled from waste electric and electronic equipment (WEEE), *Waste Manag.*, **2016**, 56, p. 438-445.

[13] C. Signoret, A.-S. Caro-Bretelle, J.-M. Lopez-Cuesta, P. Ienny, D. Perrin, MIR spectral characterization of plastic to enable discrimination in an industrial recycling context: I. Specific case of styrenic polymers, *Waste Manag.*, **2019**, 95, p. 513-525.

[14] C. Signoret, A.-S. Caro-Bretelle, J.-M. Lopez-Cuesta, P. Ienny, D. Perrin, MIR spectral characterization of plastic to enable discrimination in an industrial recycling context: II. Specific case of polyolefins, *Waste Manag.*, **2019**, 98, p. 160-172.

[15] C. Signoret, M. Edo, A.-S. Caro-Bretelle, J.-M. Lopez-Cuesta, P. Ienny, D. Perrin, MIR spectral characterization of plastic to enable discrimination in an industrial recycling context: III. Anticipating impacts of ageing on identification, *Waste Manag.*, **2020**, 109, p. 51-64.

[16] C. Signoret, A.S. Caro-Bretelle, J.-M. Lopez-Cuesta, P. Ienny, D. Perrin, Alterations of plastics spectra in MIR and the potential impacts on identification towards recycling, *Resour. Conserv. Recycl.*, **2020**, 161, 104980.

[17] Thèse réalisée par Lucie Jacquin au CERIS (Centre d'enseignement et de recherche d'IMT Mines Alès) sous la direction de Jacky Montmain et Didier Perrin.

[18] L. Jacquin, A. Imoussaten, F. Troussat, J. Montmain, D. Perrin, Evidential classification of incomplete data via imprecise relabelling: application to plastic sorting, in *Scalable Uncertainty Management* (13th Int. Conf. SUM 2019, Compiègne), Springer, **2019**, p. 122-135.

[19] L. Jacquin, A. Imoussaten, F. Troussat, D. Perrin, J. Montmain, Control of waste fragment sorting process based on MIR imaging coupled with cautious classification, *Resour. Conserv. Recycl.*, **2021**, 168, 105258.

[20] L. Jacquin, A. Imoussaten, S. Destercke, F. Troussat, J. Montmain, D. Perrin, Manipulating focal sets on the unit simplex: application to plastic sorting, in *2020 IEEE Int. Conf. Fuzzy Syst., IEEE*, **2020**, p. 1-7.

[21] C. Signoret, P. Girard, A. Le Guen, A.-S. Caro-Bretelle, J.-M. Lopez-Cuesta, P. Ienny, D. Perrin, Degradation of styrenic plastics during recycling: accommodation of PP within ABS after WEEE plastics imperfect sorting, *Polymers*, **2021**, 13, 1439.

[22] C. Signoret, A.-S. Caro-Bretelle, J.-M. Lopez-Cuesta, P. Ienny, D. Perrin, C. Mechanical, M. Aspects, Impact of PP impurities on ABS tensile properties: computational mechanical modelling aspects, *Polymers*, **2021**, 13, 1647.

[23] C. Signoret, M. Edo, D. Lafon, A.-S. Caro-Bretelle, J.-M. Lopez-Cuesta, P. Ienny, D. Perrin, Degradation of styrenic plastics during recycling: impact of reprocessing photodegraded material on aspect and mechanical properties, *J. Polym. Environ.*, **2020**, 28, p. 2055-077.

Charles SIGNORET*, docteur-ingénieur, **Anne-Sophie CARO-BRETELLE**, enseignante-chercheuse, **José-Marie LOPEZ-CUESTA**, enseignante-chercheuse, **Patrick IENNY**, enseignant-chercheur, et **Didier PERRIN**, enseignant-chercheur. C2MA, IMT Mines Alès, Université de Montpellier, Alès.

Charles SIGNORET a reçu le prix de thèse SCF Occitanie Méditerranée en 2020.



C. Signoret

* charles.van.signoret@orange.fr

45
Sc
21

Culture
sciencesChimie



Site de ressources en **Chimie** pour les enseignants

Thèmes en lien avec les
PROGRAMMES
D'ENSEIGNEMENT
Contenu validé par des
CHERCHEURS

Articles, Vidéos, Diaporamas
AGENDA, ACTUALITÉS
événements, conférences, parutions
scientifiques...

<http://culturesciences.chimie.ens.fr>

