

Projet de Physique P6
Juin 2023

Analyse IR des polymères en vue du recyclage



E. CHALEON, J. CAPART, E. BRUMENT,
V. DELBEKE, A. BACHELIER, A. ALBERT

Enseignant responsable : I. DELAROCHE

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier en premier lieu Madame Delaroche et Madame Morandi, qui nous ont accompagnés pour ce projet et nous ont permis d'aller chercher toujours plus loin. Nous remercions également Monsieur Kebir pour le temps qu'il nous a accordé et Monsieur Burel pour ses cours sur le sujet. Nous remercions également le SMEDAR pour la visite de leurs locaux

et les échanges que nous avons eus avec eux concernant le tri des déchets. Enfin, nous souhaitons remercier chaleureusement Imane Sabbar et Yuxuan Gong, élèves en CFI à l'INSA de Rouen, ainsi que leur groupe de travail, pour leurs réponses et partages concernant le recyclage des polymères.

Table des matières

REMERCIEMENTS	3
INTRODUCTION	6
1 Gestion du projet	7
2 Polymères : lien entre structure et utilisation [20, 11, 17]	7
2.1 Formation et classification	8
2.1.1 Synthèse des polymères	8
2.1.2 Types de polymères	8
2.2 Propriétés et utilisations	9
2.2.1 Thermoplastique et thermodurcissable	9
2.2.2 Cristallinité et propriétés thermiques	9
3 Spectroscopie IR [24, 25]	10
3.1 Théorie	10
3.2 Appareillage	11
3.3 Application pour déterminer la nature d'un polymère [4, 5]	13
3.4 Analyse du parafilm	13
4 Le tri	15
4.1 Visite du SMEDAR	15
4.2 Identification des polymères [26, 3, 12, 15, 27]	16
4.3 Circuit de tri [8]	17
4.4 Les objets à plusieurs matières	18
4.5 Comment faciliter le tri?	18
5 Recyclage	18
5.1 Recyclage mécanique et recyclage chimique [10]	18
5.2 Quels sont les polymères recyclables et pourquoi? [18]	19
5.3 Quelles sont les limites du recyclage aujourd'hui?	19
5.4 Comment les polymères sont-ils recyclés? Exemple du PET	20
6 Perspectives	21
6.1 Chiffres actuels et améliorations à apporter	21
6.2 Développement de nouvelles techniques de tri et recyclage [1, 10, 7, 9, 13]	22
CONCLUSION	24

Bibliographie	25
Table des figures	28
ANNEXES	29

INTRODUCTION

En France, moins de 25% des plastiques sont recyclés, bien loin derrière d'autres pays européens. De plus, l'objectif de l'union européenne est de recycler plus de 50% de nos déchets plastiques d'ici 2025. La fenêtre d'action est donc très courte, seulement 1 an et demi [21].

Durant un semestre nous nous sommes alors intéressés à cette question : La spectroscopie infrarouge (IR) pourrait-elle faciliter et améliorer le tri et le recyclage des polymères ? Pour répondre à cette question,

nous sommes allés à la rencontre de spécialistes, nous avons visité un centre de tri et analysé nous-mêmes des polymères par spectroscopie

Dans ce rapport, la gestion du projet sera tout d'abord expliquée. Puis nous définirons ce que sont les polymères. Troisièmement, la spectroscopie infrarouge sera détaillée et des exemples tirés de nos manipulations seront analysés. Ensuite, les notions de tri et de recyclage seront abordées. Pour finir, des perspectives seront proposées.

1 Gestion du projet

Nous nous retrouvions chaque semaine, les vendredis après midi pour mettre en commun le fruit de nos recherches et s'organiser. Il fallait en premier lieu choisir notre problématique, savoir vers quel "sujet" s'orienter, puisque les polymères couvrent un domaine assez large.

Voici un récapitulatif des rôles de chaque membre du groupe :

- Elise : Spectroscopie infrarouge (documentation), préparation de l'oral
- Emilie : Polymères (documentation) et création du poster
- Agathe : Tri, recyclage des polymères (documentation), préparation de l'oral
- Amaury : Responsable qualité, bibliographie, visite du SMEDAR, mise en page du rapport et organisation des séances
- Jeanne : Analyse des spectres et perspectives des polymères (documentation), préparation de l'oral
- Valentin : Responsable d'équipe, analyse et interprétation, perspectives et création du poster

Au début, nous avons découvert ensemble ce que sont les polymères, ce qui se cache derrière le mot "plastique". Nous nous sommes mis d'accord sur le thème principal de notre projet : le "cycle de vie" des polymères. Puis Mme Delaroche nous a présenté le spectroscope, et comment l'utiliser. Par la suite, nous nous sommes divisés en deux groupes (Emilie, Elise et Agathe ainsi que Jeanne, Amaury et Valentin), l'un continuant la documentation, l'autre effectuant

les manipulations sur le spectroscope. Nous avons échangé les rôles à plusieurs reprises pour permettre à chacun de manipuler et de bien comprendre l'ensemble du sujet.

La première difficulté à laquelle nous nous sommes confronté fut celle d'obtenir des spectres IR de nos plastiques "clairs" et correspondant aux polymères auxquels nous nous attendions. Pour l'emballage du beurre, le spectre obtenu avait une bande inattendue, ne correspondant pas au polymère espéré. Valentin et Emilie sont donc allés voir M. Kebir, afin de valider les analyses et obtenir une explication quant à l'étrange bande sur le spectre. De même pour le gant en nitrile, le spectre nous montre une bande qui ne concorde pas avec la théorie. Après plusieurs recherches en compagnie de Mme Delaroche, et des explications de M. Desilles, nous avons finalement pu expliquer ce phénomène (cf. Figure 22).

2 Polymères : lien entre structure et utilisation [20, 11, 17]

Les polymères sont des matériaux organiques constitués de molécules de grande taille, appelées macromolécules, formées par la répétition d'un motif issu d'une molécule simple : le monomère. Ils peuvent être naturels (ADN, protéines, cellulose, etc.) ou bien synthétiques (PE, PET, PVC, etc.). Les propriétés des polymères varient en fonction de leur composition chimique, de leur structure moléculaire et de leur masse moléculaire. Les polymères peuvent être solides, liquides ou semi-solides, transparents ou opaques, rigides ou flexibles, résistants

ou cassants, ce qui les rend extrêmement intéressants pour le monde industriel, et explique leur omniprésence dans notre quotidien.

2.1 Formation et classification

2.1.1 Synthèse des polymères

En premier lieu, plusieurs types de polymérisation sont différenciable :

Tout d’abord, la polymérisation par addition. Elle nécessite l’utilisation d’un amorceur qui se décompose en agent actif et réagit avec une première molécule, formant une nouvelle molécule qui elle-même réagit avec la suivante, et ainsi de suite, formant le polymère. Trois types de polymérisation par addition sont possibles : la polymérisation anodique, la polymérisation cathodique et la polymérisation radicalaire (respectivement de haut en bas sur la Figure 1).

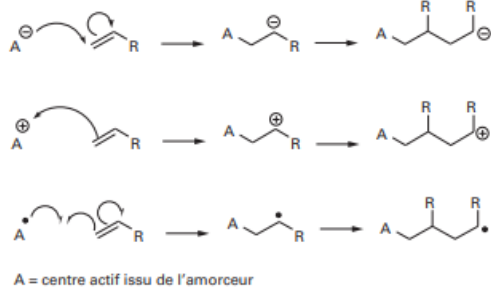


FIGURE 1 – Polymérisation par addition

Le second type de polymérisation est la polycondensation. Contrairement à celle par addition, ce type de polymérisation forme un sous-produit lors de l’addition de deux molécules, qui est dans la majorité des cas de l’eau (cf. Figure 2).

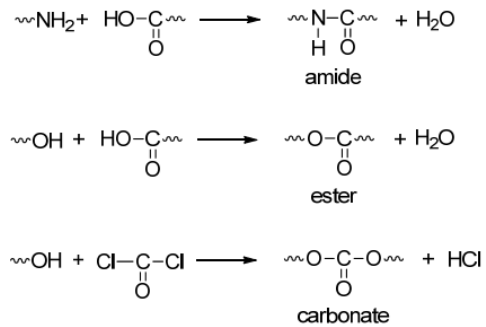


FIGURE 2 – Polycondensation

2.1.2 Types de polymères

On retrouve deux types de polymères : les homopolymères et les copolymères. Les premiers sont formés par la polymérisation d’un seul type de monomère. Les homopolymères sont des matériaux qui ont des propriétés physiques et chimiques constantes issues de leur monomère initial (cf. Figure 15).

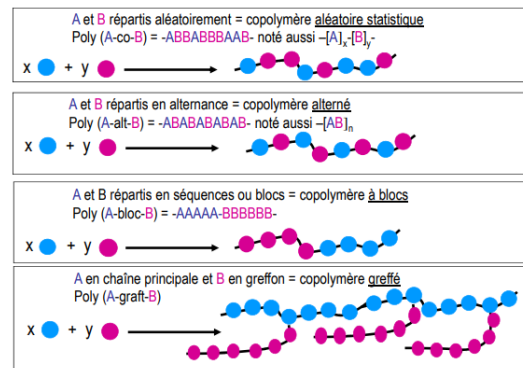


FIGURE 3 – Différents copolymères

Les copolymères sont quant à eux formés par la polymérisation de plusieurs types de monomères différents. Ils peuvent être classés en plusieurs catégories, en fonction de la répartition des monomères initiaux dans

la chaîne polymère (cf. Figure 3). Les propriétés physiques et chimiques des copolymères dépendent des propriétés des monomères individuels et de la distribution des monomères dans la chaîne polymère (cf. Figure 16).

2.2 Propriétés et utilisations

2.2.1 Thermoplastique et thermodurcissable

Un thermoplastique est un type de polymère qui peut être ramolli et façonné par chauffage. On lui donne une forme par refroidissement. Ainsi, par chauffage et refroidissement successif, il peut être réutilisé de manière répétée et réversible. Ce sont donc les plastiques recyclables et généralement solubles dans certains solvants.

Un thermodurcissable est un type de polymère qui, inversement au thermoplastique, ne peut pas être ramolli par la chaleur une fois durci. Ils ont donc une excellente résistance thermique, de même que chimique puisqu'ils sont infusibles et insolubles dans tout solvant.

Les macromolécules ont tendance à s'organiser, ce qui leur confèrent des propriétés et comportements spécifiques. On note notamment deux degrés d'organisation : les zones cristallines, où la chaîne est organisée afin de former un réseau cristallin, et les zones non-organisées appelées zones amorphes. Les polymères possédant des zones cristallines sont donc dits "semi-cristallins" (avec une proportion plus ou moins importante de zones cristallines), et les polymères ne présentant aucune zone cristalline sont dits "amorphes".

2.2.2 Cristallinité et propriétés thermiques

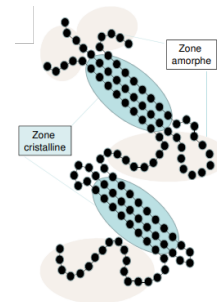


FIGURE 4 – Zones cristallines et amorphes

Les zones amorphes sont caractérisées par une température de transition vitreuse (T_g) et les zones cristallines par une température de fusion (T_f), ou de dégradation (T_d) pour les polymères thermodurcissables. La température de transition vitreuse est la température à laquelle les propriétés du polymère changent significativement et la température de fusion est la température caractérisant le moment où le polymère devient liquide, et ainsi 100% amorphe.

Ces deux températures caractéristiques sont conditionnées par la nature du polymère, c'est-à-dire : l'encombrement et la polarité liés aux groupes latéraux, le taux de réticulation, etc. Par exemple, on peut relever l'influence notable du taux de cristallinité du polymère sur sa résistance mécanique (cf Figure 14).

Les températures de transition vitreuse, de fusion et/ou de dégradation, ainsi que la nature du polymère conditionnent donc sa zone d'utilisation pour le monde industriel (Exemple ci-dessous Figure 6).

3.2 Appareillage

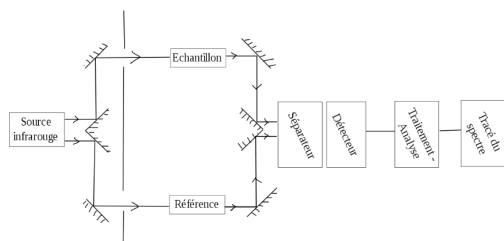


FIGURE 7 – Schéma du circuit de miroir d'un spectromètre

Pour obtenir le spectre infrarouge d'un échantillon, on envoie un faisceau de lumière infrarouge (entre 400 et 3500 cm^{-1}) à travers celui-ci. L'analyse de la lumière transmise permet de déterminer la quantité d'énergie absorbée pour chaque longueur d'onde. Il est possible de réaliser cette technique en utilisant un faisceau d'une lumière IR incidente polychromatique, puis en modifiant chaque nombre d'onde successivement, ou en utilisant un instrument à Transformée de Fourier afin d'analyser toutes les longueurs d'onde simultanément, ce dernier étant un procédé plus efficace.

Tout d'abord, dans un spectromètre infrarouge traditionnel, un faisceau de lumière infrarouge est émis et dirigé vers un monochromateur. Ce dispositif utilise un réseau de diffraction ou un prisme pour disperser la lumière en ses différentes longueurs d'onde et permet de sélectionner une longueur d'onde spécifique en ajustant la position du réseau de diffraction ou du prisme. L'un de ces faisceaux traverse l'échantillon tandis que l'autre traverse une référence, qui peut être le solvant utilisé pour dissoudre l'échantillon ou l'air ambiant. Les faisceaux sont ensuite réfléchis jusqu'à un

détecteur, après le passage dans le séparateur qui va alterner rapidement les faisceaux qui entrent dans le détecteur. Les deux signaux sont comparés et un spectre est ensuite tracé à partir de ces données. On peut, par ailleurs, obtenir les spectres en absorbance ou en transmittance et identifier les longueurs d'onde d'absorption. L'analyse de ces caractéristiques permet de révéler des détails sur la structure moléculaire de l'échantillon. Cette technique est principalement utilisée pour les échantillons qui contiennent des liaisons covalentes.

La spectroscopie infrarouge est largement utilisée dans la recherche académique et l'industrie pour mesurer, contrôler la qualité et réaliser des mesures dynamiques. Les instruments sont maintenant miniaturisés et transportables, ce qui permet des mesures en extérieur, et les échantillons en solution peuvent être mesurés précisément grâce aux technologies de filtrage informatique et de traitement des résultats. Cette technique est utile pour mesurer le degré de polymérisation en production et pour observer les réactions et processus chimiques de manière rapide et précise. La spectroscopie infrarouge est donc une technique très utilisée à la fois en chimie organique et en chimie inorganique.

La spectroscopie infrarouge à Transformée de Fourier (IRTF ou FTIR en anglais) est une technique de mesure qui utilise un interféromètre pour acquérir des spectres infrarouges. En effet, il divise le faisceau infrarouge en deux chemins optiques, puis les recombine pour produire un motif d'interférence.

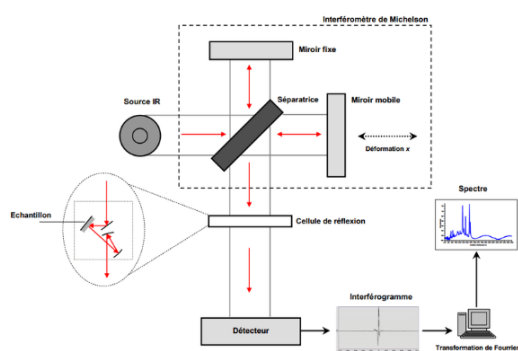


FIGURE 8 – Miroir IRTF [23]

Ce motif contient des informations sur les différentes longueurs d'onde dans le faisceau infrarouge et est ensuite transformé mathématiquement pour produire un spectre infrarouge. Les spectromètres IRTF sont avantageux car ils sont moins coûteux à fabriquer que les spectromètres conventionnels en raison de la simplicité de la construction des interféromètres par rapport aux monochromateurs. En outre, ils permettent une acquisition de spectre plus rapide car toutes les fréquences sont collectées simultanément, contrairement aux spectromètres dispersifs qui peuvent prendre jusqu'à une demi-heure pour effectuer une mesure. Cela rend possible l'analyse de nombreux échantillons qui peuvent être moyennés ensemble pour améliorer la sensibilité. Ainsi, la plupart des spectromètres infrarouges modernes sont des instruments IRTF en raison de ces nombreux avantages.

Par rapport à l'effet isotopique, la spectroscopie infrarouge peut fournir des détails sur les différents isotopes d'une espèce. Par exemple, la fréquence d'étirement $O - O$ de l'oxyhémocyanine peut être mesurée expérimentalement par spectrométrie et vaut 832 cm^{-1} pour le $\nu(^{16}O - ^{16}O)$ et à 788 cm^{-1} pour

le $\nu(^{18}O - ^{18}O)$.

Comme on peut l'observer sur les documents ci-dessous, le spectre infrarouge d'une substance organique est une représentation graphique permettant de déterminer sa nature. Il contient des informations sur les vibrations et les modes de rotation des liaisons atomiques présentes dans la molécule. Le spectre infrarouge peut se scinder en deux grandes parties : les pics entre 3000 et 1500 cm^{-1} donnent des informations sur les liaisons présentes dans la molécule, et ceux entre 1500 et 400 cm^{-1} sont, quant à eux, propres à chaque molécule : cette zone est donc appelée la zone d'empreinte digitale. De plus, les tables de spectres infrarouges sont des outils précieux pour l'interprétation et l'identification des composés, facilitant ainsi les travaux de recherche, d'analyse et de caractérisation chimique. Cependant, une expertise et une compréhension des principes de base sont nécessaires pour une interprétation précise des spectres infrarouges.

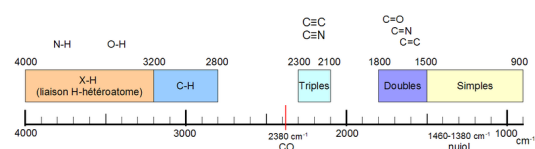


FIGURE 9 – Zones du spectre infrarouge

En conclusion, la spectroscopie infrarouge est une technique analytique importante pour l'analyse des molécules et des matériaux et est largement utilisée en chimie, en biologie, en médecine ainsi que dans de nombreux autres domaines de recherche et d'application. Elle permet d'identifier les groupes fonctionnels, de caractériser les liaisons et de mesurer les propriétés des molé-

cules en terme de vibrations et de modes de rotation. Grâce à des développements récents, comme la spectroscopie infrarouge bidimensionnelle ou la spectroscopie infrarouge non linéaire, cette technique continue d'évoluer et de fournir des informations de plus en plus précises sur les systèmes étudiés.

3.3 Application pour déterminer la nature d'un polymère [4, 5]

Dès lors que la théorie a été abordée, l'application de cette théorie en est la suite logique. Pour ce faire, les matières de déchets classiques seront identifiées afin de comprendre l'enjeu de l'abondance des polymères dans notre mode de consommation. En effet, dans la démarche de recyclage, une zone d'ombre persiste : comment identifier efficacement les polymères en présence afin de mieux les recycler ? C'est l'objectif de cette partie : identifier chacun de nos déchets à l'aide d'un spectromètre infrarouge. Pour ce faire, la méthodologie suivante a été utilisée :

Après avoir paramétré correctement le spectromètre, en ayant suivi la notice fournie, une première analyse à blanc est effectuée. En effet l'opération « background » nous permet d'enregistrer un spectre de bruit de fond (background) de l'air, qui sera ensuite soustrait au spectre obtenu de l'échantillon. Cela permet notamment de se débarrasser des absorptions parasites.

À partir de spectres de références Fourier Transform Infrared Spectrometry (FTIR), une comparaison entre nos spectres à ces derniers a été effectuée. Puis, par identifi-

cation, nous avons vérifié la correspondance entre les bandes de nos spectres et ceux de référence. Ainsi, par cette méthode, il nous a été facile de retrouver l'ensemble des polymères mis en jeu dans nos emballages. Toutefois, nous avons fait face à un problème : les additifs. En effet, les additifs sont bel et bien présents dans une majorité d'emballages. Connus sous le nom d'agents antistatiques, d'additifs plastiques antidérapants, d'additifs anti-usure et d'additifs primaires d'accrochage, ces derniers modifient les propriétés physiques de l'emballage mais aussi sa composition chimique (se répercutant dans différents emballages analysés). Nous en avons donc tenu compte lors de leur apparition dans certains emballages. Finalement, grâce aux spectres de références, l'ensemble des polymères a pu être identifié. Un tableau explicite les informations tirées de chaque bande pour chacun des spectres.

3.4 Analyse du parafilm

Voici l'analyse du parafilm pour comprendre comment nous avons procédé :

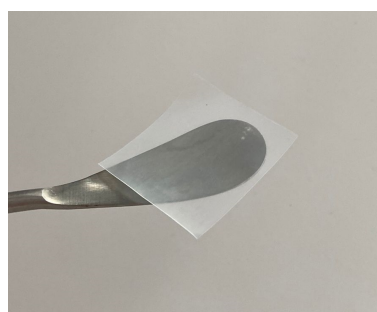


FIGURE 10 – Photo du parafilm analysé

Tout d'abord, nous analysons un échantillon de parafilm au spectromètre. Nous utilisons le Perkin Elmer Spectrum Two as-

socié au logiciel Spectrum pour spectroscopie IRFT et équipé de l'ATR (Attenuated Total Reflectance). Une fois en possession du spectre infrarouge (Figure 11), nous pouvons procéder à l'analyse. Pour ce faire, nous procédons par correspondance avec les spectres de référence FTIR (Figure 12). La simple vue du spectre obtenu nous permet directement d'éliminer certains polymères. En effet, nous constatons que l'absence de bande à 1455 cm^{-1} nous permet d'éliminer le PP (les spectres du PP et du PE se ressemblent fortement, cette vigilance est nécessaire avant toute autre comparaison). Ensuite, en procédant de la même manière avec d'autres spectres FTIR nous affinons la sélection pour aboutir au bon spectre de référence. Pour ce faire, nous réalisons une lecture de gauche à droite et par corres-

pondance de bande nous déterminons finalement le polymère dont il est sujet ici.

Par exemple dans notre cas, en partant de 4000 cm^{-1} nous rencontrons premièrement les bandes 2916 et 2848 cm^{-1} qui correspondent à un étirement de la liaison CH_2 . Par la suite, nous identifions les bandes respectivement à 1472 et $1388/1365\text{ cm}^{-1}$ qui correspondent bien à la déformation des alcanes pour la bande à 1472 cm^{-1} et la vibration en mode parapluie (hybridation sp^3). Et enfin nous retrouvons bien les bandes à 729 et 719 cm^{-1} pour la crête de bascule du CH_2 divisée. Sur l'ensemble des bandes ainsi identifiées, nous constatons bien la correspondance avec le FTIR du PE, ce qui nous permet de conclure sur la nature du polymère du parafilm. Enfin, toutes les analyses effectuées sont disponibles en annexe.

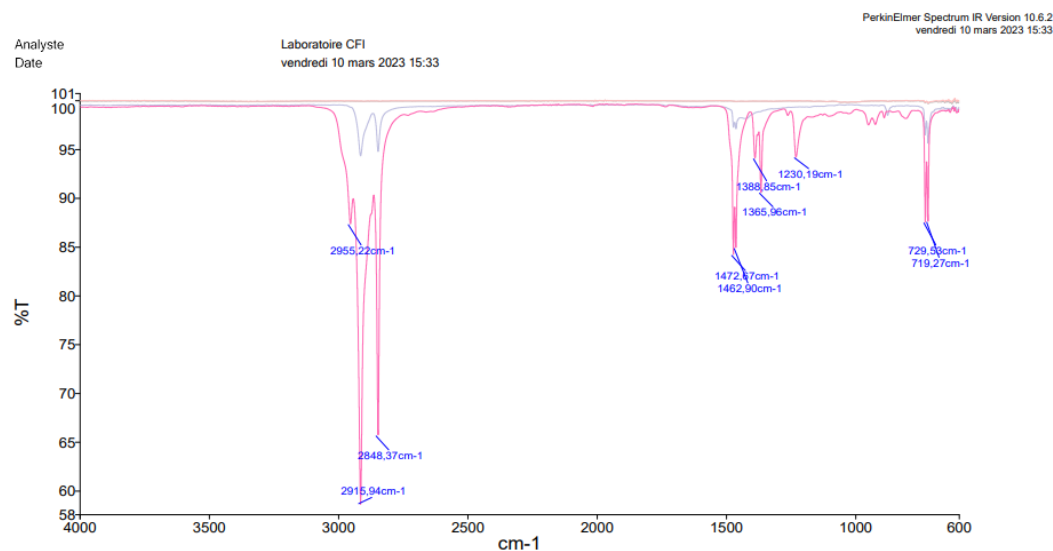
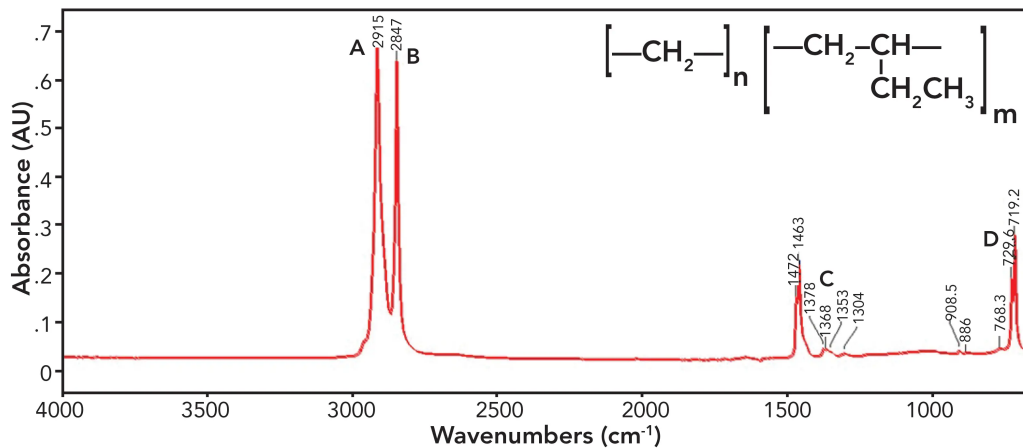


FIGURE 11 – Spectre infrarouge expérimental du PE



A	2915	CH ₂ , Asymmetric Stretch
B	2847	CH ₂ , Symmetric Stretch
C	1378	CH ₃ Umbrella Mode
D	729/719	Split CH ₂ Rocking Peak

FIGURE 12 – FTIR du PE

Nombre d'onde (cm ⁻¹)	Liaison	Type de vibration
2916	CH ₂	élongation asymétrique
2848	CH ₂	élongation symétrique
1472	CH ₂ et CH ₃	déformation des alcanes
Entre 1388 et 1365	CH ₃	mode parapluie hybridation sp ³
729/719	CH ₂	crête de bascule du CH ₂ divisée ("split CH ₂ rocking peak")

4 Le tri

4.1 Visite du SMEDAR

Dans le cadre de ce projet, nous avons eu l'occasion de visiter l'écopôle VESTA (Valorisation Énergétique, Site de Tri de l'Arrondissement de Rouen), tenu par le Syndicat Mixte d'Élimination des déchets de l'Arrondissement de Rouen (SMEDAR). Ce

centre prend en charge 110 t/jour de déchets recyclables. Arrivant par camion sous forme de déchets en vrac et de sacs poubelles jaunes, les déchets sont triés selon plusieurs grandes catégories comme papier, carton, PEHD, PET, et autres plastiques. Compactés en balles, ces déchets triés sont ensuite envoyés dans d'autres centres recyclant avec plus de précision, comme nous le verrons dans les prochaines parties, ou alors

transmis à des entreprises revalorisant ces déchets. Une partie des déchets est aussi utilisée pour la production d'électricité par incinération. C'est le cas par exemple du PE.

4.2 Identification des polymères [26, 3, 12, 15, 27]

Même si ce sont des polymères, tous les plastiques ne se recyclent pas ensemble. Il faut donc les identifier pour ensuite les trier et les recycler ou non. De plus, le tri est nécessaire pour obtenir un matériau recyclé le plus pur possible et en conserver les propriétés. L'identification est donc une étape clé et doit être réalisée le plus minutieusement possible. Nous allons donc aborder l'identification des polymères, qui intervient dans les étapes de sur-tri, c'est à dire une fois que les plastiques ont été séparés des autres déchets. Selon L'Usine Nouvelle [26], le tri des bouteilles est le plus abouti techniquement. Nous allons donc commencer par nous concentrer sur cet exemple.

Généralement, la première étape de tri est le tri manuel, pour classer en grandes catégories. Les bouteilles d'eau minérale (en PVC ou PET) sont séparées des bouteilles de lait et d'entretien (en PEHD). Ensuite, la seconde étape est automatique puisqu'il faut qu'elle soit infaillible et rapide. Cette étape consiste à passer les bouteilles en file sous un capteur pour ensuite les rediriger grâce à des éjecteurs ou des aiguillages selon leur matériau. Différents types de capteurs sont utilisés, faisant varier le coût et l'efficacité de l'installation. Il y a d'abord la fluorescence X, qui est la technique la plus ancienne. Elle identifie le PVC en excitant les atomes du plastique avec des rayons X

et en détectant les rayons secondaires émis par le chlore présent dans le PVC. Mais cette technique est insuffisante. En effet, selon la qualité du lot, l'écrasement des bouteilles etc., elle est plus ou moins efficace. Elle est donc utilisée en premier sur la ligne de tri pour identifier la majeure partie du PVC. L'identification infrarouge est ajoutée à la ligne de tri. Celle-ci permet d'identifier beaucoup de types de polymères (PE, PVC, PET, PS, ABS, ...). Il existe différentes techniques qui travaillent en IR. La MIR (mid-infrared de 4000 à 400 cm^{-1}) permet d'analyser les plastiques de toutes les couleurs et de les différencier ; permettant, par exemple, de séparer le PET foncé du PET clair. Cette technique est malheureusement plutôt lente. La technique NIR (near-infrared de 14000 à 400 cm^{-1}) est plus rapide et coûteuse mais ne peut analyser pas les échantillons noirs. Certains fournisseurs ajoutent aussi une caméra CDD pour différencier la taille des contenants. A savoir que ce qui différencie vraiment les fournisseurs c'est le moyen de mettre en œuvre les différents capteurs plutôt que les capteurs eux-mêmes.

Ce tri par détection est donc très abouti pour le tri des bouteilles mais n'est pas forcément efficace pour d'autres types de déchets comme les broyés. Les déchets broyés sont en majorité les matériaux dits pollués ou impurs. Les capteurs vont donc avoir beaucoup de mal à identifier le polymère. On broie donc ces déchets puis les lave pour enlever les restes d'étiquettes et de produits. Ensuite, il faut les identifier et les trier. Il existe de multiples méthodes pour cela [12]. La flottaison dans des bacs est très répandue pour le PEHD et le PVC. Elle consiste

à différencier les particules par leur densité en les disposant dans des grands bacs d'eau. Il faut que les polymères aient une différence de densité d'au moins $0,2 \text{ g/cm}^3$. Il existe aussi la séparation électrostatique qui consiste à frotter les particules entre elles puis les faire passer entre deux électrodes. Suivant leurs charges, elles vont se séparer vers l'électrode du signe opposé et ainsi être triées. Cette méthode ne permet de trier que deux polymères à la fois mais elle n'utilise pas d'eau et peu d'énergie [3]. Elle est utilisée notamment pour le PP et PE (bouteilles et bouchons). En annexe, vous trouverez le schéma du séparateur Hamos GmbH qui suit cette méthode (Figure 19). Il existe beaucoup d'autres méthodes mais celles-ci ne sont pas utilisées en industrie ou sont spécifiques à seulement deux polymères.

4.3 Circuit de tri [8]

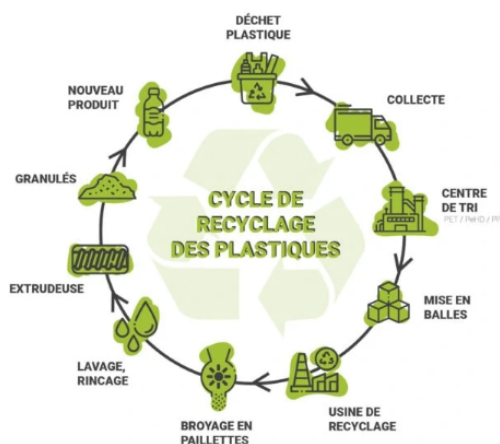


FIGURE 13 – Cycle du recyclage

Le circuit de tri des polymères diffère selon le type de plastique (seulement le PET,

le PEHD et PP sont recyclable), permettant leur recyclage et leur réutilisation. Le tri est une étape clé dans le processus de recyclage, car elle permet de séparer les différents types de polymères pour faciliter leur traitement [8].

Le circuit de tri des polymères s'effectue selon les étapes suivantes :

Étape 1 : Collecte. Les plastiques sont collectés auprès des consommateurs et des entreprises, via des programmes de collecte sélective et des centres de dépôt de déchets.

Étape 2 : Séparation initiale. Les plastiques sont triés en fonction de leur forme et de leur taille. Ils sont ensuite séparés des autres matériaux non plastiques à recycler, tels que le métal et le verre.

Étape 3 : Tri automatisé. Des technologies avancées telles que les scanners optiques (technologie de spectrométrie infrarouge), les séparateurs par densité et les séparateurs magnétiques sont utilisées pour trier les plastiques en fonction de leur type ou de leur couleur.

Étape 4 : Tri manuel. Les plastiques triés sont vérifiés par des travailleurs spécialisés qui identifient et séparent les différents types de polymères ayant échappé à la détection automatique (polymère dont la couleur se confond avec le tapis, par exemple). Une fois triés, les différents types de plastiques sont conditionnés en balles, puis envoyés pour être traités et recyclés en fonction de leur type spécifique de polymère.

4.4 Les objets à plusieurs matières

Pour finir, certains emballages sont composés de plusieurs matériaux différents difficiles à séparer dans la phase de tri. C'est le cas de certaines boîtes de jus de fruit ou encore des briques de lait. Dans ces dernières, une feuille d'aluminium et un film plastique sont souvent couplés pour mieux protéger le contenu. Il est donc impossible de trier les deux éléments séparément. Une solution a été trouvée pour recycler les briques de lait : plutôt que de chercher à séparer les deux matières, elles sont mélangées et forment ensemble un "alliage" métal-plastique très résistant. Celui-ci permet de faire des grilles par exemple, ainsi que de nombreux objets souvent faits en métal et nécessitant une forte résistance mécanique.

4.5 Comment faciliter le tri ?

Afin de faire gagner du temps aux usines de tri et éviter les erreurs qui empêcheraient le recyclage ensuite, il est nécessaire de faire des efforts sur notre tri. Mettre les déchets dans les bonnes poubelles est l'étape la plus importante. Depuis le 1er janvier 2023 [15], tous les emballages plastiques, métalliques et cartonnés, ainsi que le film plastique et le polystyrène ont leur place dans la poubelle jaune. Il n'y a donc plus besoin de regarder les codes résines (cf annexe Figure 20) pour déterminer le polymère et savoir où le jeter. Il suffit de se demander si c'est un emballage. Il faut d'abord vérifier que votre commune ait mis cette mesure en place mais d'ici 2024, toute la France devrait la suivre.

Pour finir, il est primordial de séparer les différentes matières du déchet. Par exemple,

l'opercule et l'emballage. De plus, il faut faire attention à ne pas imbriquer les déchets entre eux. Enfin, il est préférable et demandé d'écraser les bouteilles verticalement et non horizontalement concernant l'agglomération rouennaise. En effet, chaque centre de tri peut utiliser différents moyens de séparation. Il est donc recommandé de s'informer sur les consignes de tri de son lieu de vie.

5 Recyclage

Une matière est considérée recyclable si, après transformation, elle peut être introduite dans une chaîne de production pour produire de nouveaux objets. Ainsi, certains plastiques sont recyclables notamment les polymères thermoplastiques car ils fondent sous l'effet de la chaleur. D'autres, comme les polymères thermodurcissables sont beaucoup plus difficiles à recycler car ils se durcissent sous ce même effet.

Plusieurs moyens sont possibles pour recycler les polymères, le recyclage peut-être chimique ou mécanique. Nous allons voir dans cette partie ces différents procédés. Puis nous verrons quels polymères peuvent se recycler et quels autres sont difficilement transformables.

5.1 Recyclage mécanique et recyclage chimique [10]

Le recyclage chimique consiste à décomposer les polymères en produits chimiques de base à l'aide de solvants ou de réactifs chimiques, qui peuvent ensuite être utilisés pour fabriquer de nouveaux produits. Cette

méthode est utile pour recycler des polymères complexes qui sont difficiles à décomposer par d'autres moyens. Néanmoins, ce procédé requiert un budget important dû à la création de nouvelles infrastructures adaptées.

Le recyclage mécanique traditionnel implique de broyer et de fondre les polymères usagés pour les réutiliser. Cependant, le recyclage mécanique avancé utilise des nouvelles technologies pour séparer les différents types de polymères et éliminer les contaminants. Les polymères sont sur-triés, lavés, broyés, extrudés, et transformés en paillettes ou granulés, pour être réutilisés sous la forme de matière première recyclée (MPR), sans que la structure du polymère soit modifiée. Cependant, avec ce procédé, on ne peut faire que des boucles de recyclage ouvertes. En d'autres termes, il n'est pas possible de refaire le produit original après un recyclage mécanique. D'autres applications sont alors mises en place comme la fabrication de sacs-poubelles.

La pyrolyse est un processus chimique qui consiste à chauffer les polymères à des températures élevées en l'absence d'oxygène pour les décomposer en gaz, en huile et en coke. Ces produits peuvent être utilisés pour fabriquer de nouveaux produits, tels que des combustibles et des lubrifiants.

5.2 Quels sont les polymères recyclables et pourquoi ? [18]

Les polymères recyclables ne sont qu'une partie des polymères triés. En effet, seulement les plastiques composés de PET, de PP par injection, de PE(HD/LD) et certains

PS et PVC sont transformables. Ils peuvent aussi être utilisés comme combustibles pour brûler d'autres déchets non-recyclables.

Concernant le PVC, seulement certains produits intègrent le cycle de recyclage. Il s'agit principalement de déchets issus de la construction. Les polystyréniques, eux, sont très peu transformables. Il est tout de même possible d'arriver à recréer des emballages ou encore des matériaux isolants.

Le polypropylène formé par injection est recyclable en intégralité. En effet, il peut être recyclé plusieurs fois de suite pour fabriquer, à chaque recyclage, un nouvel objet. Ceci lui confère ainsi un avantage non négligeable pour l'environnement car une tonne de plastique recyclé équivaut à 830 litres de pétrole économisé. Cependant, le PP "film" est beaucoup plus difficile à recycler. En effet, sa très faible épaisseur le rend beaucoup plus difficile à trier et à transformer.

5.3 Quelles sont les limites du recyclage aujourd'hui ?

Le recyclage « mécanique » est une technologie ayant permis d'atteindre en France un taux de recyclage de 58% pour les bouteilles et flacons en PET et PEHD. Après la consommation et le rejet d'un déchet d'emballage en plastique dans un centre habilité, le recyclage mécanique consiste à trier, broyer, laver et fabriquer des granulés, sans effectuer aucune modification de la structure de la matière. Cette technologie, qui est fiable et maîtrisée, ne peut traiter toutefois que des déchets d'une certaine qualité et le plastique ainsi recyclé perd tout de même une partie de ses propriétés. D'autre part,

les additifs, les colorants, les charges minérales qui le composent et qui apportent différentes fonctionnalités à l'emballage, ne sont pas entièrement éliminés lors du processus. C'est pourquoi il est nécessaire de trouver d'autres procédés. En effet, seulement 29% des emballages en plastique sont recyclés et 61% des bouteilles et des flacons (seuls) sont recyclés. Il y a donc encore une marge de progrès à réaliser. [1]

5.4 Comment les polymères sont-ils recyclés ? Exemple du PET

Le recyclage du plastique peut être décomposé en plusieurs étapes principales évoquées précédemment. Nous allons ici prendre l'exemple du PET d'une bouteille plastique. Une fois trié et récupéré par balles, le PET est broyé et réduit sous forme de paillettes. Ensuite vient l'étape de la séparation des bouchons et étiquettes grâce à un lavage en machine avec de l'eau chaude et des détergents. Les paillettes de bouchon en PEHD sont séparées du PET grâce à leur différence de densité. En effet, le PEHD est plus léger que le PET. Pour augmenter la teneur en PET, les autres polymères sont détectés par une caméra puis aspirés, c'est le tri optique. Vient ensuite la phase d'extrusion qui consiste à chauffer les paillettes pour en faire des joncs puis de les refroidir et découper en granulés qui peuvent être clairs ou colorés en fonction du type de PET (clair ou foncé). Après cela, une dernière purification est faite en utilisant la polymérisation par polycondensation. Les molécules subissent une succession de réactions chimiques pour former de nouvelles chaînes

de PET et ainsi éliminer les molécules trop courtes qui possèdent une résistance mécanique plus faible. Une fois séchés, les granulés sont vendus à d'autres entreprises fabriquant des objets en plastique et fermant ainsi la boucle du recyclage. En effet, dans les usines de recyclage, les granulés de PET vont servir à la fabrication de nombreux objets de la vie courante, comme des bouteilles d'eau ou de jus de fruits, des rembourrages de couette, des écharpes en polaire etc. Il faut, par exemple, 6 flacons de liquide vaisselle pour pouvoir former la mousse nécessaire pour garnir une peluche. Le processus de recyclage ne se limite pas à cela. Grâce à l'extension des consignes de tri, de plus en plus de produits courants seront fabriqués à partir de plastique recyclé. Par exemple, il est possible de fabriquer un cintre à partir de six pots de yaourt ou encore deux sacs poubelle à partir de sept films et sacs en plastique. Les opportunités offertes par le recyclage sont donc nombreuses. Cependant, à chaque fois que le polymère est chauffé à plus de 200 °C, il perd des propriétés mécaniques car ses chaînes se brisent. Ainsi, on ne peut utiliser que 10% de PET recyclé pour créer un nouvel objet ayant de bonnes résistances mécaniques.

Les polyéthylènes sont principalement utilisés pour faire des sacs ou des jouets. Tous ces objets pourront être recyclés pour former de nouveaux sacs plastiques pour les ordures ménagères ou encore pour un usage industriel. Il est aussi possible de créer un copolymère à base de polyéthylène et d'acétate de vinyle qui, mélangé avec d'autres thermoplastiques permettent de produire des colles industrielles. Toutefois, la combustion du PE est lente et très

exothermique, ce polymère permet donc un grand rendement énergétique dans les incinérateurs servant à produire de l'électricité.

6 Perspectives

En France, les trois quarts des plastiques produits sont incinérés ou enfouis dans des décharges, ce qui pose des problèmes environnementaux considérables. Il convient donc de changer le cycle de vie des plastiques [22].

6.1 Chiffres actuels et améliorations à apporter

Intéressons-nous maintenant aux améliorations qui peuvent être mises en place. En 2018, la France avait généré 527 kg de déchets par habitant. Elle se situe donc parmi les producteurs de déchets "moyens-supérieurs" [2]. De plus, le taux de recyclage de la France étant en dessous de la moyenne européenne la même année (44%), nous ne sommes donc pas en mesure de bien gérer nos ressources plastiques pour un avenir durable. Comment pouvons-nous réduire notre production annuelle de déchets ? Y a-t-il un moyen de recycler plus de déchets ? Nous allons voir ce qui peut être mis en place, à plusieurs échelles [2].

Tout d'abord, vient une solution toute simple : produire moins. Mais notre mode de consommation nous invite à jeter un produit cassé plutôt que de le réparer. Nous pouvons ainsi parler du principe pollueur-payeur. Les pollueurs doivent supporter les coûts engendrés par la pollution résultante de leurs propres activités, y compris le coût des mesures prises pour prévenir, combattre

et éliminer cette pollution. De plus, avec le dérèglement climatique qui s'accélère, il est nécessaire d'augmenter le budget d'investissement dans le recyclage des plastiques. Pour 2030, selon le rapport du GIEC, celui-ci devrait être de 7,2 milliards d'euros pour le recyclage chimique en Europe [6, 21].

De plus, nous souhaitons évoquer deux principes permettant de suivre la durabilité des matières premières utilisées pour la production de polymères recyclés et de garantir ainsi aux consommateurs et aux partenaires commerciaux que ces produits sont écologiquement responsables. Il s'agit des principes de Mass Balance et de l'ISCC (International Sustainability and Carbon Certification).

Le principe de "mass balance" est une méthode qui permet de tracer la quantité de matières premières renouvelables utilisées dans la production de polymères recyclés (énoncés précédemment, comme le PET ou le PP). Cela signifie que les entreprises peuvent utiliser des matières premières renouvelables, telles que des huiles végétales, pour produire des polymères recyclés en quantités équivalentes à celles des matières premières fossiles. Ainsi, une entreprise peut prouver qu'elle utilise des matières premières renouvelables en déclarant la proportion utilisée pour chaque lot de polymères recyclés produits.

L'ISCC est un système de certification utilisé pour vérifier la durabilité des matières premières, notamment pour les polymères recyclés. Ce système évalue l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement, depuis la production des matières premières jusqu'à la transformation en polymères recyclés, en passant par la logistique. Les entreprises qui obtiennent la certification

ISCC peuvent prouver que leurs produits sont durables et respectueux de l'environnement.

L'enjeu serait d'avoir un maximum d'entreprises certifiées ISCC, afin que le recyclage des polymères soit plus responsable (en 2019, seulement 100 entreprises françaises étaient certifiées) [19, 16].

6.2 Développement de nouvelles techniques de tri et recyclage [1, 10, 7, 9, 13]

Le recyclage représente l'une des nombreuses solutions dans l'action contre la pollution causée par les déchets plastiques et la réduction de la consommation des énergies fossiles. Actuellement, le taux de recyclage des emballages plastiques s'élève à environ 28% en France [1]. En 2019, les plastiques recyclés représentaient en Europe seulement 9,8% de la consommation de plastiques (European paper recycling council). Toutefois, les nouvelles technologies se développent de plus en plus. En effet, partout dans le monde, de l'Allemagne au Canada, en passant par le Japon, ces nouvelles technologies prennent de l'importance. La France, encore en marge de cette émergence, tend à participer à ce mouvement. De plus, l'intérêt des acteurs industriels, et notamment des grands producteurs de polymères, semble évoluer dans le même sens.

En effet, les travaux de recherche, de développement et les réalisations concrètes ont été accélérés notamment par le contexte grandissant des réglementations et des normes sociétales ainsi que l'extension des consignes de tri à tous les emballages en plastique. Nous pouvons citer les exemples

du projet FUSCIA, de Total, ou encore de Recycling Technologies, mais aussi de Nestlé, Mars et Citeo qui se sont associés pour tester une nouvelle technique industrielle de recyclage par pyrolyse de l'ensemble de leurs emballages en plastique les plus complexes, sur le territoire français.

D'autre part, avec sa production de 240 000 tonnes de polymères par an, Total expérimente le recyclage du polystyrène par dissolution sur son site de Carling (67). Nous pouvons également mettre en lumière Soprema (isolation) qui recycle l'équivalent de 5000 tonnes par an de Polyéthylène téréphthalate (PET) provenant de barquettes et d'emballages complexes. Leur objectif est désormais de doubler cette capacité dans un futur proche. D'autres porteurs de projets comme Carbios et l'IFP Energies Nouvelles développent également des innovations prometteuses en terme de recyclage des polymères.

Une autre solution est l'utilisation des bioplastiques. Ce sont des polymères fabriqués à partir de matières premières renouvelables, telles que les plantes. Les bioplastiques peuvent être décomposés par des processus biologiques tels que le compostage, offrant ainsi une solution plus écologique que les plastiques traditionnels. Cette solution est encore en développement et en expérimentation, mais elle pourrait jouer un rôle important dans l'avenir du recyclage des polymères.

D'autres techniques pourraient être mises en place afin d'améliorer le rendement du recyclage des polymères :

Recyclage après tri assisté par laser : des chercheurs ont mis au point une technologie de tri par laser qui permet de séparer

les plastiques par couleur (et de les séparer en fonction de leur composition chimique). Cette technologie (qui permet de détecter, par infrarouge, le polymère en question de manière précise) pourrait aider à améliorer la qualité des matériaux recyclés, ce qui pourrait permettre de les réutiliser dans des applications plus exigeantes.

Recyclage de pointe : certaines entreprises travaillent actuellement sur des méthodes de recyclage de pointe qui utilisent des robots pour trier les plastiques en fonction de leur composition chimique (après test de flottaison et identification Infra-Rouge) et de leur couleur. Cette méthode pourrait être plus rapide et plus efficace que le recyclage manuel, ce qui pourrait permettre de réduire les coûts et d'augmenter le taux de recyclage. Le remplacement de la main d'œuvre humaine dans cette optique permettrait d'automatiser la chaîne de recyclage et donc d'avoir une plus grande précision sur le long terme

En somme, le futur du recyclage des polymères pourrait passer par des méthodes plus avancées et plus durables qui permettraient de récupérer les matériaux initiaux à partir de sources renouvelables, de les trier plus efficacement et de les utiliser pour créer de nouveaux produits avec moins d'impact

sur l'environnement.

Pour finir, il faut noter qu'en France, 58% des bouteilles et flacons en PET et PEHD sont recyclés. Toutefois, d'autres moyens sont à mettre en oeuvre pour recycler d'autres matériaux comme le PS, le PE, ou encore le PVC. Plusieurs pistes sont prometteuses [28] :

1. La dépolymérisation par des alcools ou des enzymes permettant de casser les liaisons
2. La dissolution d'une matière plastique dans un solvant spécifique ensuite filtrée et nettoyée pour obtenir une matière purifiée (en somme un développement du recyclage chimique) ou encore la gazéification abordée précédemment, résultant de la pyrolyse.

Ces différentes solutions sont connues mais encore difficiles à industrialiser. En revanche, d'autres polymères sont directement jetés ou brûlés. C'est le cas du polystyrène. Une solution qui vient d'être développée est de placer le PS sous une source d'UV et d'y ajouter un catalyseur. Cela conduit à la transformation du PS en DPM, une espèce utile pour le domaine pharmaceutique ainsi que celui de la création de polymères.

CONCLUSION

La spectroscopie infrarouge représente une technique plutôt prometteuse pour faciliter et améliorer le tri et le recyclage des polymères. En effet, son utilisation permet d'identifier et de caractériser les différentes structures moléculaires présentes dans les polymères, ce qui ouvre la voie à un triage plus efficace des matériaux. De plus, la spectroscopie infrarouge peut également détecter les contaminants indésirables présents dans les plastiques recyclés grâce à leurs signatures spectrales spécifiques. Cela permet de garantir la qualité et la pureté des matériaux recyclés, améliorant ainsi leur valorisation et leur réutilisation. Toutefois, ces avantages ne sont pas suffisants pour contrer les défauts de cette technique tels que son coût et sa complexité de mise en œuvre, non automatisable donc nécessitant du personnel qualifié. Un point non négligeable reste le temps d'analyse : bien qu'assez rapide,

cela reste bien trop lent pour traiter l'ensemble des déchets dans les délais impartis sans compter les déchets composés de plusieurs matériaux qui ne peuvent pas être détectés efficacement par spectroscopie. Tout cela limite donc très fortement son utilisation à grande échelle, au profit de techniques de tri basées sur la taille ou la densité qui sont des processus automatiques et plus économiques.

La spectroscopie infrarouge est ainsi généralement mieux adaptée aux laboratoires de recherche, aux applications spécialisées et aux analyses plus détaillées plutôt qu'à une utilisation à grande échelle dans les centres de tri. Cependant, des progrès technologiques futurs pourraient permettre de surmonter certaines de ces limitations et rendre la spectroscopie infrarouge plus viable dans des contextes de tri à grande échelle.

Bibliographie

- [1] ADELIN ABEGG : *Recyclage des plastiques : cap sur les nouvelles technologies*. 30 Mars 2020. – URL <https://www.citeo.com/interview-dun-expert/recyclage-des-plastiques-cap-sur-les-nouvelles-technologies>
- [2] ARTHUR OLIVIER : *Emballages en plastique : les chiffres du recyclage dans l'Union européenne*. 23 Juillet 2021. – URL <https://www.toutteleurope.eu/environnement/emballages-en-plastique-les-chiffres-du-recyclage-dans-l-union-europeenne/>
- [3] B2B PLAST : *Séparateur des plastiques par triboélectricité*. Consulté le 17 Mai 2023. – URL <https://www.b2bplast.fr/separation-et-tri-plastique-par-triboelectricite/>
- [4] BRIAN C. SMITH : *The Infrared Spectra of Polymers III : Hydrocarbon Polymers*. 1 Novembre 2021. – URL <https://www.spectroscopyonline.com/view/the-infrared-spectra-of-polymers-iii-hydrocarbon-polymers>
- [5] BRIAN C. SMITH : *Infrared Spectroscopy of Polymers, VIII : Polyesters and the Rule of Three*. 1 Octobre 2023. – URL <https://www.spectroscopyonline.com/view/infrared-spectroscopy-of-polymers-viii-polyesters-and-the-rule-of-three>
- [6] CITEPA : *Principe du pollueur-payeur*. 21 Juillet 2021. – URL https://www.citepa.org/fr/2021_07_a06/#:~:text=Selon%20le%20principe%20du%20pollueur,%C3%BBts%20li%C3%A9s%20%C3%A0%20la%20r%C3%A9paration
- [7] ESTHER BUI TEKANT : *Recyclage du plastique : la France parmi les pays les plus innovants*. 26 Octobre 2021. – URL <https://www.geo.fr/environnement/recyclage-du-plastique-la-france-parmi-les-pays-les-plus-innovants-206779>
- [8] GROUPE PHYSITEK : *Recyclage des polymères, les défis relevés par la spectrométrie*. 10 Mars 2021. – URL <https://www.physitek.fr/a-decouvrir/recyclage-des-polymeres-les-defis-relevés-par-la-spectrometrie/>
- [9] IFP ÉNERGIES NOUVELLES : *Recyclage des plastiques : quelles voies d'avenir ?* 29 Mars 2022. – URL <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/article/synthese-et-replay-disponibles-table-ronde-recyclage-des-plastiques-quelles-voies-davenir>
- [10] IFP ÉNERGIES NOUVELLES : *Recyclage du plastique*. Consulté le 14 Avril 2023. – URL <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/enjeux-et-prospective/decryptages/climat-environnement-et-economie-circulaire/tout-savoir-recyclage-du-plastique>

- [11] IMT, ÉCOLE DES MINES D'ALBI-CARMAUX : *Structure des polymères*. Consulté le 5 Février 2023. – URL https://nte.mines-albi.fr/SciMat/fr/co/SM_uc1-5-4.html
- [12] J.-J. ROBIN : *Méthodes de tri des matières plastiques*. Mars 1998. – URL https://record-net.org/storage/etudes/96-0901-1A/rapport/Rapport_record96-0901_1A.pdf
- [13] JUSTINE DANIEL : *Réduire les déchets en Europe : vous n'imaginez pas le poids que vous pouvez avoir*. 27 Octobre 2018. – URL <https://www.touteleurope.eu/environnement/reduire-les-dechets-en-europe-vous-n-imaginez-pas-le-poids-que-vous-pouvez-avoir/>
- [14] MAINOC : *PLASTIQUE - Les emballages industriels en film plastique*. Consulté le 20 Avril 2023. – URL <http://mainoc.free.fr/pages/Technique/plasti/categori/catego.htm>
- [15] MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET DE LA COHÉSION DES TERRITOIRES : *Tri des déchets*. 14 Octobre 2022. – URL <https://www.ecologie.gouv.fr/tri-des-dechets>
- [16] MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET DE LA COHÉSION DES TERRITOIRES : *Bilan 2020 de la production de déchets en France*. Novembre 2022. – URL https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2022-11/datalab_essentiel_293_dechets2020_novembre2022.pdf
- [17] MR BUREL : *Cours de Chimie d'ouverture - Polymères*
- [18] NATASIA MICHAELS : *Le polypropylène : un plastique solide et recyclable mais pas toujours écologique*. 6 Janvier 2023. – URL <https://www.geo.fr/environnement/le-polypropylene-une-forme-de-plastique-plus-facilement-recyclable-170439>
- [19] NATIONAL GEOGRAPHIC : *Le plastique en 10 chiffres*. Consulté le 26 Avril 2023. – URL <https://www.nationalgeographic.fr/le-plastique-en-10-chiffres>
- [20] PAPREC : *Classification des matières plastiques*. Consulté le 14 Avril 2023. – URL <https://www.paprec.com/fr/comprendre-le-recyclage/tout-savoir-sur-les-matieres-recyclables/plastiques/la-classification-des-types-de-matieres-plastiques/>
- [21] POLYVIA : *Recyclage chimique où en sommes-nous ?* 17 Janvier 2023. – URL <https://www.polyvia.fr/fr/recyclage-chimique-ou-en-sommes-nous-definition-tendance#:~:text=Le%20recyclage%20chimique%20des%20polym%C3%A8res,la%20gaz%C3%A9ification%20en%20font%20partie>

- [22] POLYVIA : *Recyclage chimique, mécanique et bio ressource : quelles solutions pour les plastiques de demain ?* 7 Juin 2021. – URL <https://www.polyvia.fr/fr/economie-circulaire/replay-webinaire-recyclage-chimique-mecanique-et-bio-ressource-quelles>
- [23] RESEARCH GATE : *Schéma de principe d'un spectromètre FTIR*. Consulté le 31 Mai 2023. – URL https://www.researchgate.net/figure/5-Schema-de-principe-d-un-spectrometre-FTIR_fig12_281470448
- [24] TECHNO-SCIENCE.NET : *Spectroscopie infrarouge*. Consulté le 24 Février 2023. – URL <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Spectroscopie-infrarouge.html>
- [25] THIERRY HAMAIDE : *Matériaux Polymères - Architecture macromoléculaire*. 28 Juin 2016. – URL <https://culturesciences.chimie.ens.fr/thematiques/chimie-des-materiaux/polymeres/materiaux-polymeres-architecture-macromoleculaire>
- [26] USINE NOUVELLE : *Matériaux : Le tri automatique des polymères s'industrialise*. 1 Février 1996. – URL <https://www.usinenouvelle.com/article/materiaux-le-tri-automatique-des-polymeres-s-industrialise.N77840>
- [27] UVED : *Quelques méthodes simples d'identification des matériaux*. 2013. – URL http://stockage.univ-valenciennes.fr/EcoPEM/BoiteA/co/A_1_P_1.html
- [28] VIRGINIA POLYTECHNIC INSTITUTE AND STATE UNIVERSITY : *Des chercheurs trouvent une nouvelle méthode pour recycler le polystyrène*. 28 Août 2022. – URL <https://www.chemeurope.com/fr/news/1177471/des-chercheurs-trouvent-une-nouvelle-mthode-pour-recycler-le-polystyrene.html>

Table des figures

1	Polymérisation par addition	8
2	Polycondensation	8
3	Différents copolymères	8
4	Zones cristallines et amorphes	9
5	Zones de résistance mécanique en fonction de la température	10
6	Zones d'état, Tg et Tf [14]	10
7	Schéma du circuit de miroir d'un spectromètre	11
8	Miroir IRTF [23]	12
9	Zones du spectre infrarouge	12
10	Photo du parafilm analysé	13
11	Spectre infrarouge expérimental du PE	14
12	FTIR du PE	15
13	Cycle du recyclage	17
14	Zones de résistances mécaniques en fonction de la température selon diffé- rentes cristalinités	30
15	Exemples d'homopolymères [25]	30
16	Exemples de copolymères [25]	31
17	Modes de vibration	31
18	Table de référence spectroscopique	32
19	Schéma du séparateur Hamos GmbH	33
20	Codes résines pour l'identification du polymère	33
21	NBR	34
22	Evolution du spectre du NBR au cours du temps	35
23	PE	36
24	PE	37
25	PET	38
26	PP	39
27	PE	40
28	PP	41
29	PET	42
30	PS	43

ANNEXES

Lexique et acronymes

- IR : infrarouge, rayonnement électromagnétique de longueur d'onde comprise entre 780 nm et 1 mm.
- Polymère, Macromolécule : molécule à très longue chaîne ayant une masse molaire élevé ($> 500 \text{ g.mol}^{-1}$)
- PET : Polyéthylène téréphtalate
- PVC : Polychlorure de vinyle
- PS : Polystyrène
- PE (HD/LD) : Polyéthylène de haute ou basse densité (High/Low)
- PMMA : Polyméthacrylate de méthyle
- PP : Polypropylène
- NBR : Nitrile
- SMEDAR : Syndicat Mixte d'Élimination des déchets de l'Arrondissement de Rouen
- VESTA : Valorisation Énergétique, Site de Tri de l'Arrondissement de Rouen, en référence à la déesse de la mythologie romaine Vesta veillant sur le foyer
- ISCC : International Sustainability and Carbon Certification
- MIR : Mid-infrared
- NIR : Near-infrared
- MPR : Matière Première Recyclée
- Fourier Transform Infrared Spectrometry (FTIR) : spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier

Images

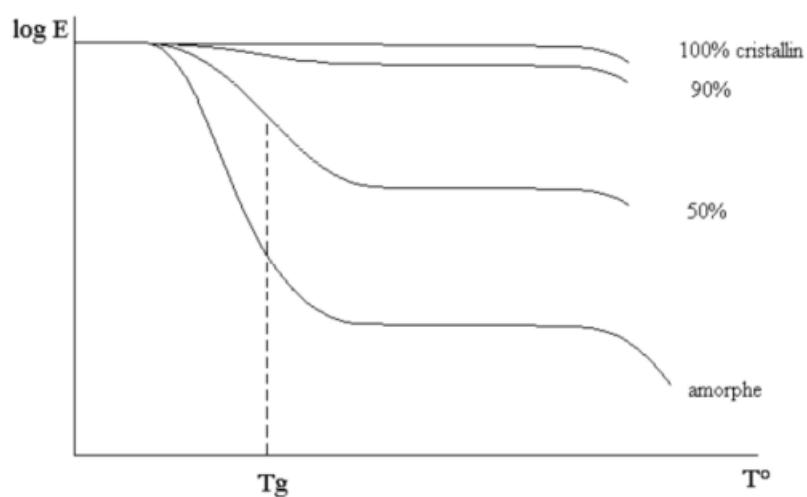


FIGURE 14 – Zones de resistances mécaniques en fonction de la température selon différentes cristalinités

monomère		polymère	
formule	nom usuel	unité de répétition	nom usuel
$\text{CH}_2=\text{CH}_2$	éthène (éthylène)	$-(\text{CH}_2-\text{CH}_2)_n-$ ⁽¹⁾	polyéthylène
	propène (propylène)		polypropylène
	chlorure de vinyle		poly(chlorure de vinyle)

FIGURE 15 – Exemples d'homopolymères [25]

monomères		unité de répétition des macromolécules nom usuel du polymère
	Acide téréphthalique + éthylène glycol	 poly(éthylène téréphthalate) (PET)
	acide adipique + hexaméthylène diamine (hexane-1,6-diamine)	 polyamide 6,6 (PA 6,6)

FIGURE 16 – Exemples de copolymères [25]

Elongation symétrique	Elongation antisymétrique	Cisaillement	Bascule	Agitation	Torsion

FIGURE 17 – Modes de vibration

Liaison	Nombre d'onde σ (cm ⁻¹)	Intensité ⁽¹⁾
O—H _{libre} ⁽²⁾	3580 - 3650	Forte ; fine
O—H _{lié} ⁽²⁾	3200 - 3400	Forte ; large
N—H	3100 - 3500	Moyenne
C _{tri} —H ⁽³⁾	3000 - 3100	Moyenne
C _{tri} —H _{aromat.} ⁽⁴⁾	3030 - 3080	Moyenne
C _{tét} —H ⁽⁵⁾	2800 - 3000	Forte
C _{tét} —H _{aldéhyde}	2750 - 2900	Moyenne
O—H _{acide carb.}	2500 - 3200	Forte ; large
C=O _{ester}	1700 - 1740	Forte
C=O _{aldéh. cétone}	1650 - 1730	Forte
C=O _{acide}	1680 - 1710	Forte
C=C	1625 - 1685	Moyenne
C=C _{aromat.}	1450 - 1600	Moyenne
C _{tét} —H	1415 - 1470	Forte
C _{tét} —O	1050 - 1450	Forte
C _{tét} —C _{tét}	1000 - 1250	Forte

FIGURE 18 – Table de référence spectroscopique

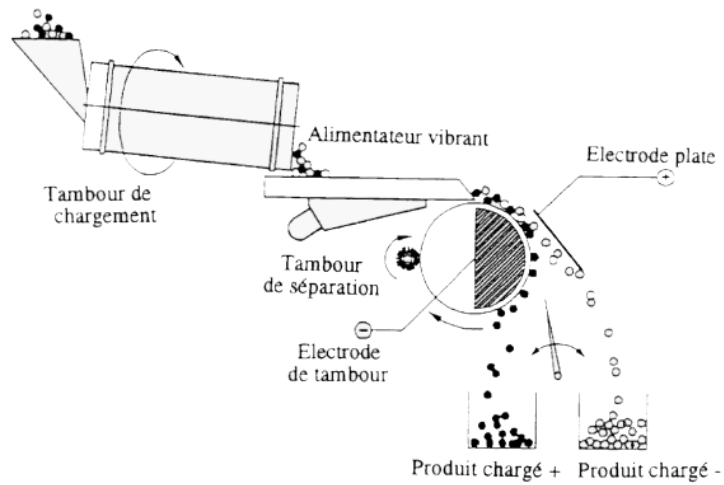


FIGURE 19 – Schéma du séparateur Hamos GmbH

PLASTIC RESIN IDENTIFICATION CODES

PETE	HDPE	PVC	LDPE	PP	PS	OTHER
Polyethylene Terephthalate	High Density Polyethylene	Polyvinyl Chloride	Low Density Polyethylene	Polypropylene	Polystyrene	Other
soft drink and water bottles, food packaging, fruit, juice containers and cooking oil, shampoo bottles	milk, water, juice jugs, yogurt pots, soap dispenser, cleaning products, grocery bags	pipe and window fittings, thermal insulation, car parts, trays for sweets, bubble foil, food foil	frozen food bags, bread bags, food bags, shopping bags, magazine wrapping	ketchup bottles, microwave meal trays, wall covering, syrup bottle, yogurt container	cosmetic bag, plates and CD cases, egg cartons, protective packaging	5-gallon water bottles, other plastic including acrylic paint, fiberglass, baby bottle
Recyclable	Recyclable	Non-recyclable	Non-recyclable	Recyclable	Non-recyclable	Non-recyclable

FIGURE 20 – Codes résines pour l'identification du polymère

Analyses

Gant bleu de laboratoire : NBR

Nombre d'onde (cm ⁻¹)	Liaison	Type de vibration
3430	OH (Alcool)	élongation (dégradation)
2916	CH ₂	élongation asymétrique
2848	CH ₂	élongation symétrique
2240	C ≡ N	élongation
1437	CH (sp ³)	déformation
967	CH (butadiène)	déformation

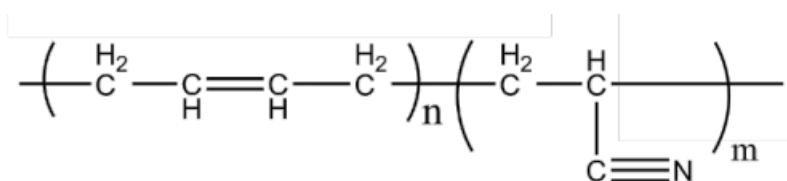
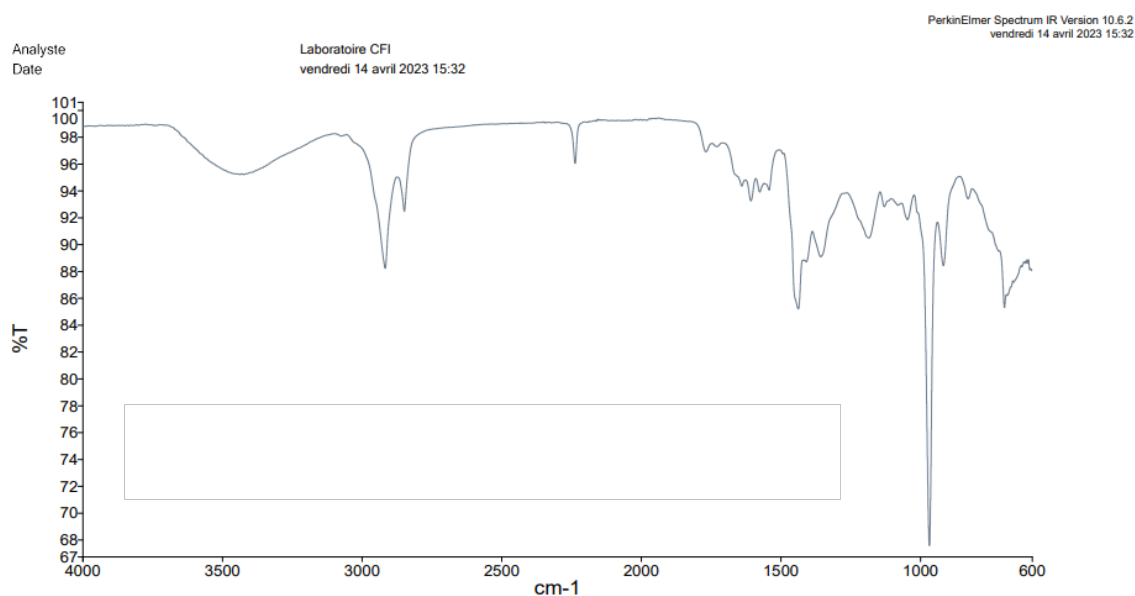


FIGURE 21 – NBR

On remarque une bande OH vers 3400 cm⁻¹ alors qu'il n'y en a pas dans le NBR. Celle-ci peut s'expliquer grâce à la dégradation du gant au fil du temps, notamment au contact de l'air (cf. Figure 22).

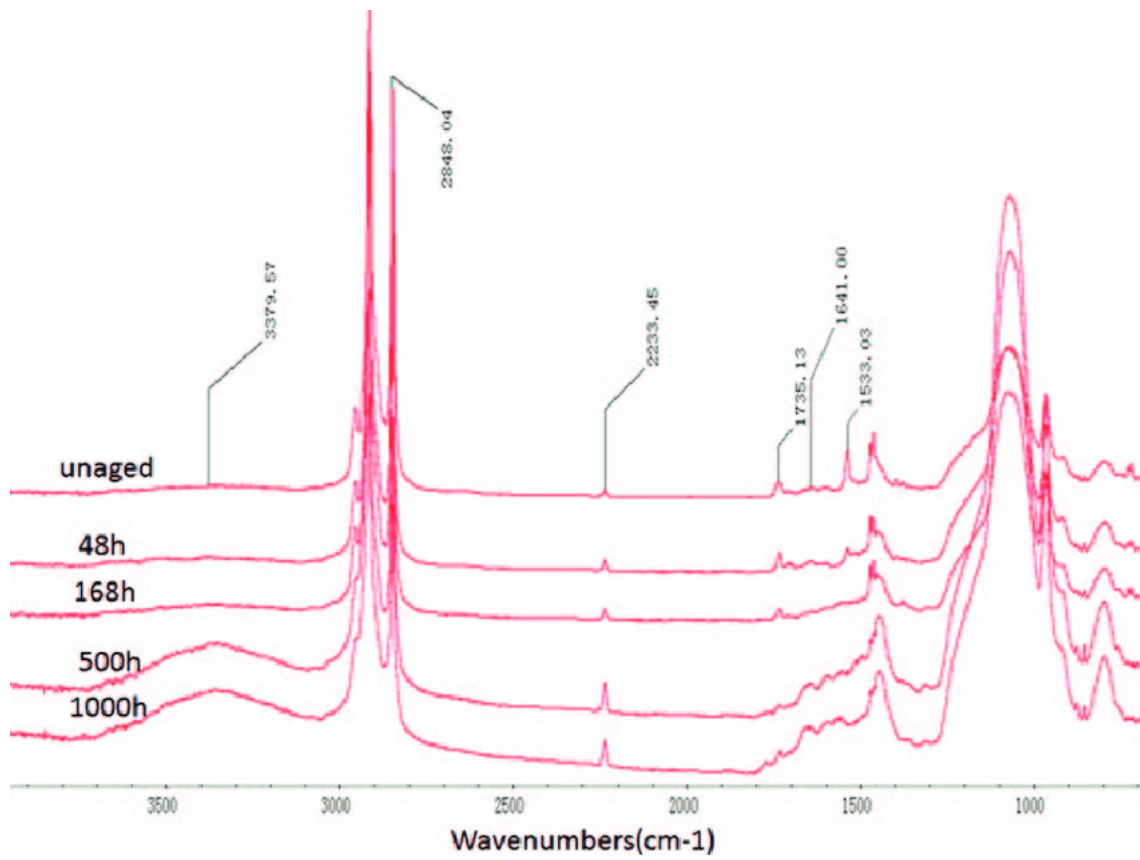


FIGURE 22 – Evolution du spectre du NBR au cours du temps

Sac poubelle : HDPE

Nombre d'onde (cm ⁻¹)	Liaison	Type de vibration
2918	CH ₂	élongation asymétrique
2848	CH ₂	élongation symétrique
1462	CH ₂ et CH ₃	déformation des alcanes
729 et 719	CH ₂ (butadiène)	crête de bascule du CH ₂ divisée ("split CH ₂ rocking peak")

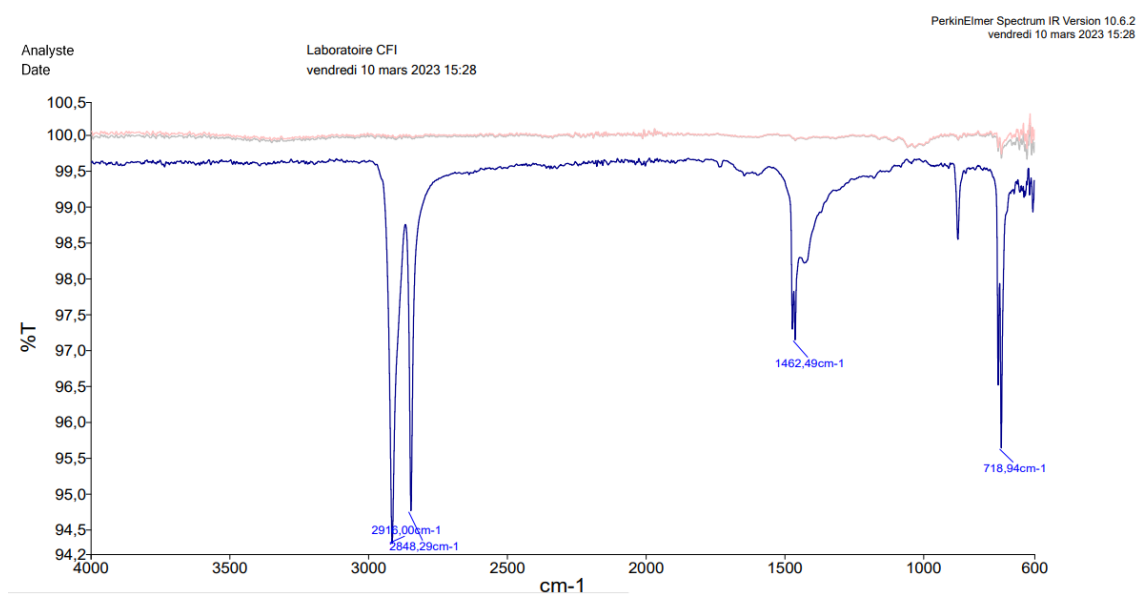


FIGURE 23 – PE

Bouchon de Badoit : HDPE

Nombre d'onde (cm ⁻¹)	Liaison	Type de vibration
2915	CH ₂	élongation asymétrique
2848	CH ₂	élongation symétrique
1462	CH ₂ et CH ₃	déformation des alcanes
729 et 719	CH ₂ (butadiène)	crête de bascule du CH ₂ divisée ("split CH ₂ rocking peak")

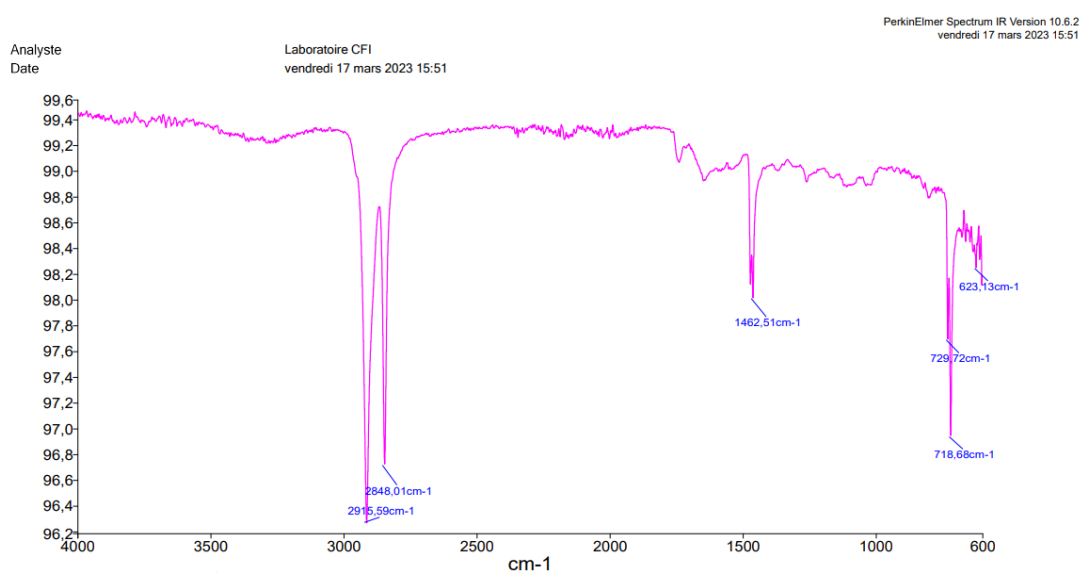


FIGURE 24 – PE

Bouteille Transparente : PET

Nombre d'onde (cm^{-1})	Liaison	Type de vibration
2969	CH_2	élongation asymétrique
1713	$\text{C} = \text{O}$ (Acide carboxylique)	élongation symétrique
722	CH_2 (butadiène)	crête de bascule du CH_2 divisée ("split CH_2 rocking peak")

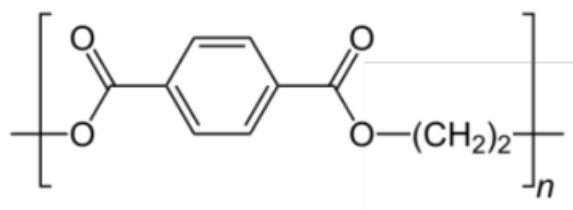
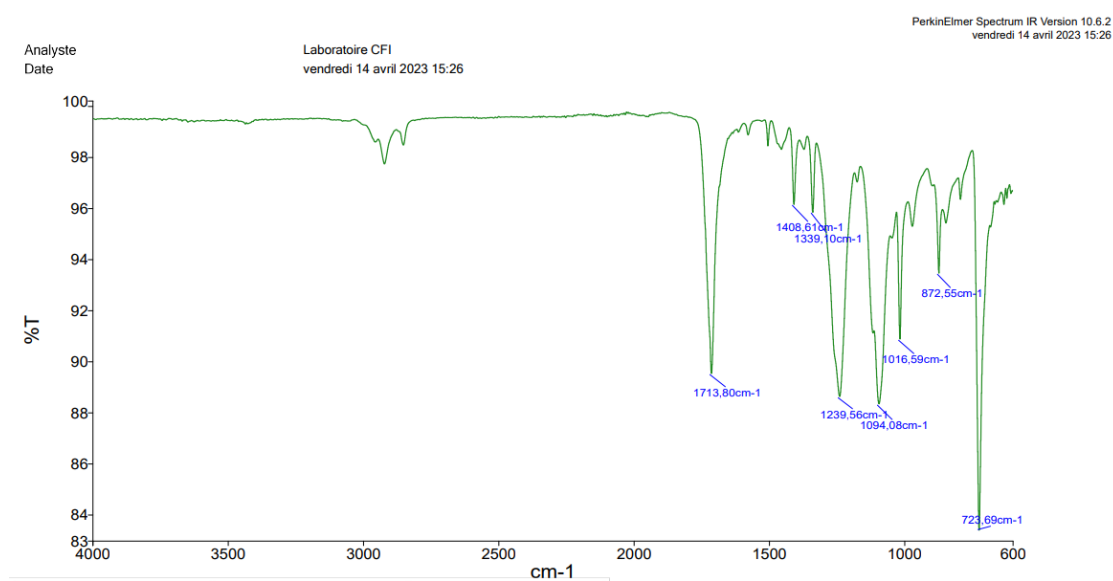


FIGURE 25 – PET

Emballage de beurre : PP

Nombre d'onde (cm ⁻¹)	Liaison	Type de vibration
2917	CH ₂	élongation asymétrique
2838	CH ₂	élongation symétrique
1455	CH ₂ et CH ₃	déformation des alcanes
1376	CH ₂	mode parapluie Hybridation sp ³
1167	C – C/CH ₃	élongation / vibration de bascule
997	C – CH ₃ /CH (butadiène)	vibration de bascule
973 et 841	C – C/CH ₃	élongation / déformation
973 et 841	C – C/CH ₃	élongation / vibration de bascule

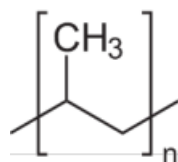
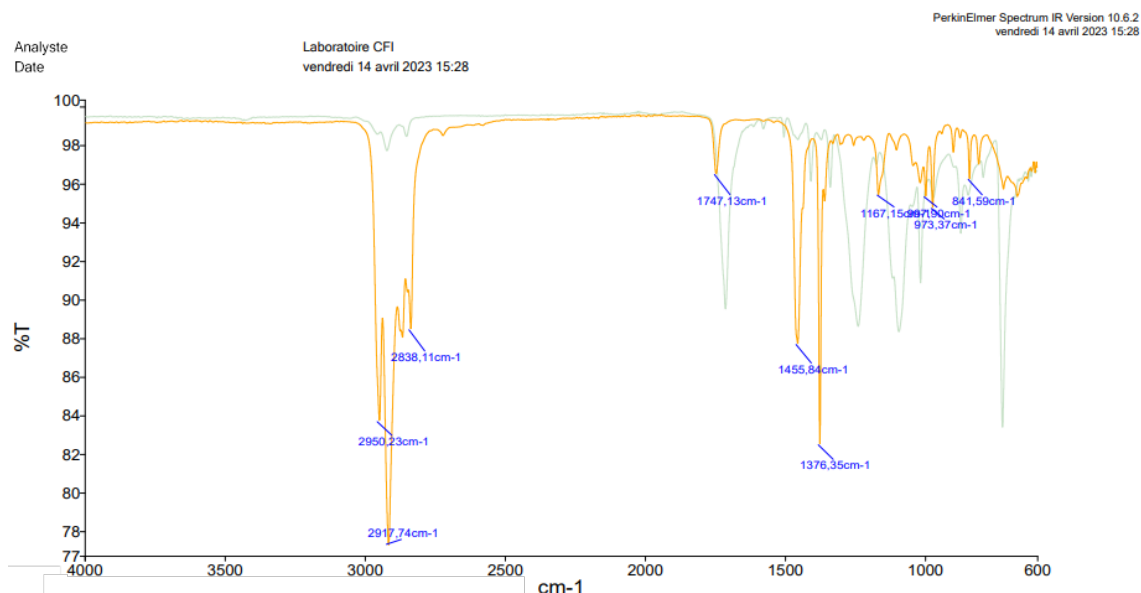


FIGURE 26 – PP

On remarque néanmoins une bande à 1747 cm⁻¹. Celle-ci peut être due aux additifs présents dans le beurre, ou bien à un mauvais nettoyage de notre échantillon avant l'analyse.

Emballage Lustucru : PE

Nombre d'onde (cm ⁻¹)	Liaison	Type de vibration
2916	CH ₂	élongation asymétrique
2848	CH ₂	élongation symétrique
1464	CH ₂ et CH ₃	déformation des alcanes
719	CH ₂ (butadiène)	crête de bascule du CH ₂ divisée ("split CH ₂ rocking peak")

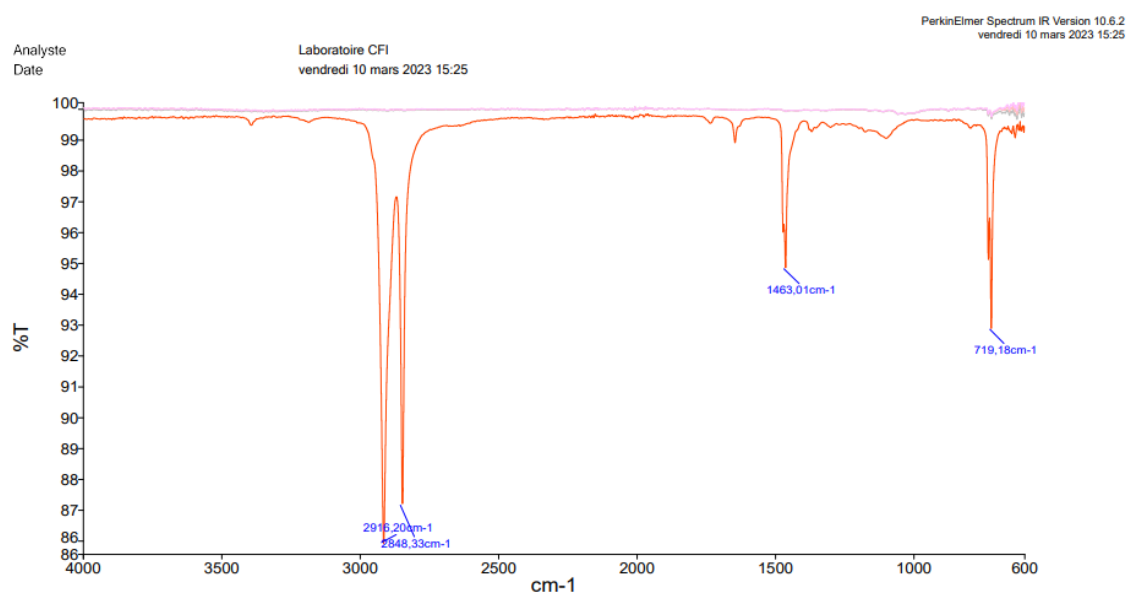


FIGURE 27 – PE

Emballage Pain de mie : PP

Nombre d'onde (cm ⁻¹)	Liaison	Type de vibration
2917	CH ₂	élongation asymétrique et symétrique
1375	CH ₃	mode parapluie Hybridation sp ³

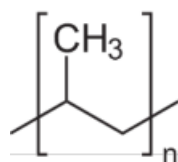
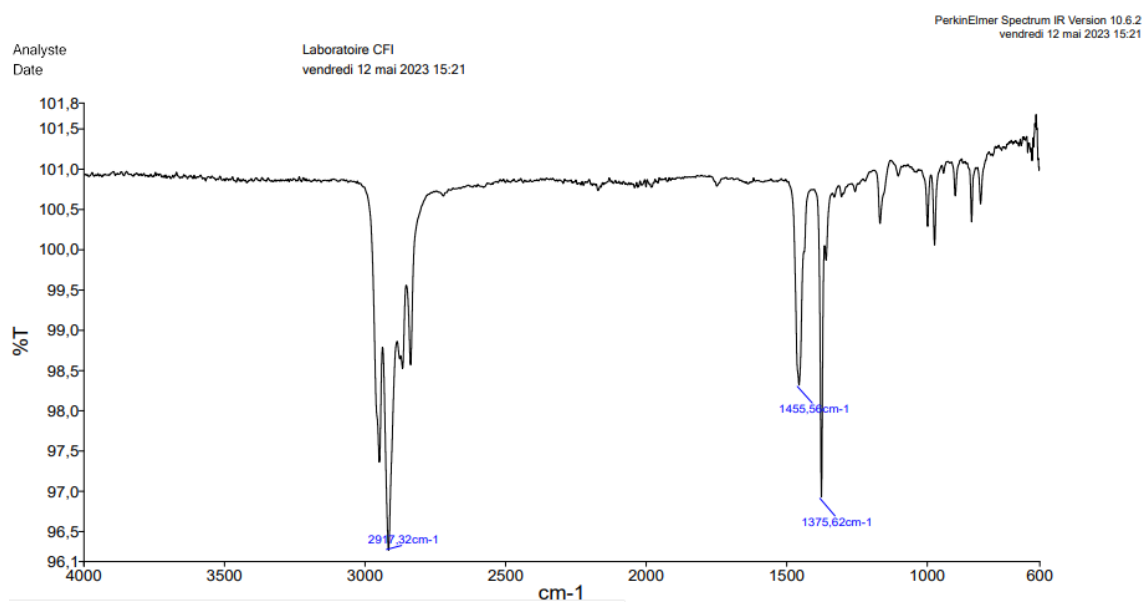


FIGURE 28 – PP

Pilote Friction : PET

Nombre d'onde (cm ⁻¹)	Liaison	Type de vibration
1714	C = O (Acide carboxylique)	élongation
1238	C - O (Téréphtalate)	flexion
1091	C - O	élongation
872	O - C - OH	flexion
723	CH ₂	crête de bascule du CH ₂ divisée ("split CH ₂ rocking peak")

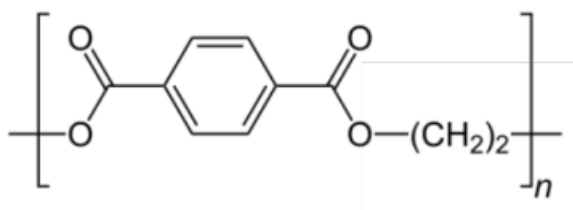
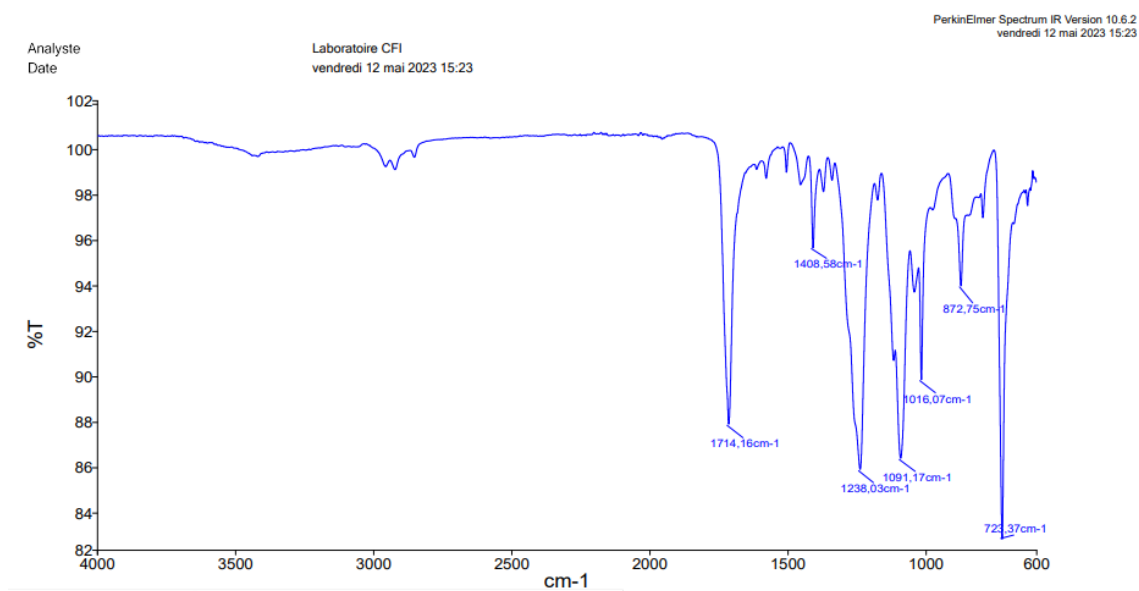


FIGURE 29 – PET

Pot de yaourt : PS

Nombre d'onde (cm ⁻¹)	Liaison	Type de vibration
2921	CH ₂	élongation symétrique et asymétrique
1492	CH ₂ et CH ₃	déformation des alcanes
753	CH	courbure aromatique hors plan
695	Cycle	courbure du cycle aromatique

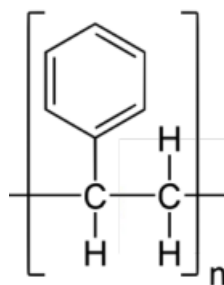
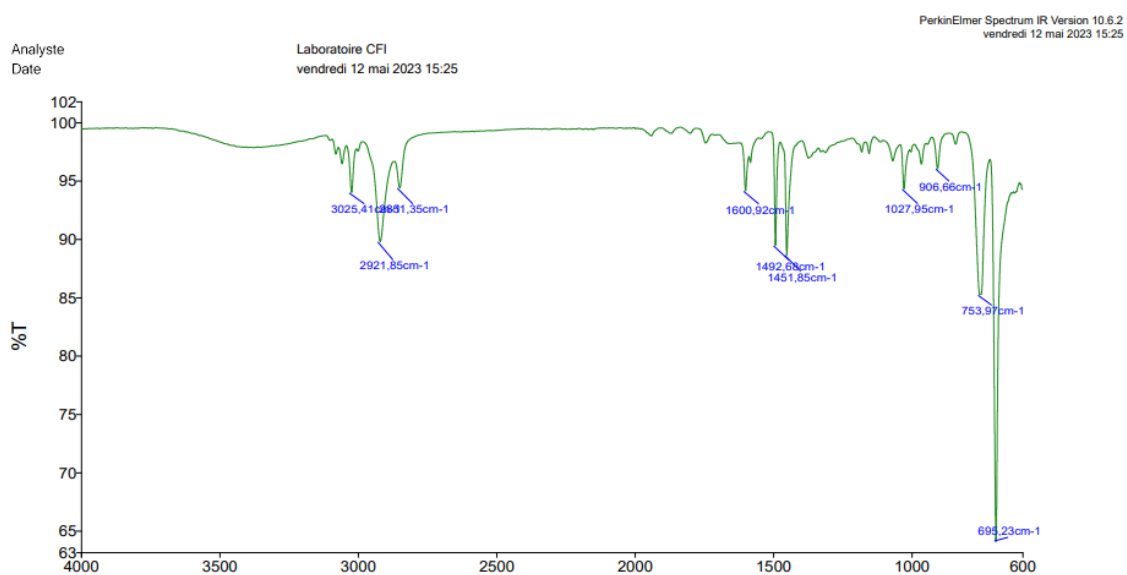


FIGURE 30 – PS