

École polytechnique de Louvain

Technical, environmental and cultural analysis of Low Tech recycled PP & PE materials

A case study

Author: **Romain LECLEF**

Supervisor: **Thomas PARDOEN**

Readers: **Alain JONAS, Naïma SALLEM, Florent HANNARD**

Academic year 2022–2023

Master [120] in Biomedical Engineering

Table des matières

0.1	Remerciements	4
0.2	Glossaire et abréviations	5
1	INTRODUCTION	6
1.1	Contexte	6
1.2	Emergence du Low tech	7
1.3	Propriétés du PP et du PE	9
1.3.1	Thermoplastique	10
1.3.2	Polypropylène (PP)	10
1.3.3	Polyéthylène (PE)	12
1.4	Recyclage du plastique	13
1.4.1	Contexte	13
1.4.2	Recyclage Industriel	15
1.4.3	Recyclage Low-Tech	20
1.4.4	Autres solutions	23
1.5	Propriétés des polyoléfines une fois recyclé	26
1.5.1	HDPE	26
1.5.2	PP	27
2	Analyse de cycle de vie	29
2.1	Introduction	29
2.2	Définition du Life Cycle Assesment	30
2.3	Objectif et champ de l'étude :	32
2.4	EcoInvent 3 comme base de données	34
2.5	ILCD2011+ comme méthode de calcul	34
2.6	Gate to Gate	35

2.7	Géographie	35
2.8	Inventaire du cycle de vie	36
2.8.1	Recyclage LOW-TECH	37
2.8.2	Recyclage industriel	42
2.8.3	Incinération	43
2.9	LCIA	45
2.9.1	Choix des impacts analysés	45
2.9.2	Normalisation	46
2.9.3	Scénario 1 : Recyclage industriel	47
2.9.4	Scénario 2 : Recyclage Low-Tech	49
2.9.5	Scénario 3 : Incinération avec récupération d'énergie	50
2.10	Interprétations	52
2.11	Conclusion	55
3	Caractérisation du matériau	57
3.1	Introduction	57
3.2	Matériaux et méthodes	57
3.2.1	Échantillons	58
3.2.2	Tomographie	59
3.2.3	Essais avec le tribomètre	59
3.2.4	Tests de micro-dureté	63
3.3	Résultats et analyse	65
3.3.1	Tomographie	65
3.3.2	Volume de saillie	67
3.3.3	Micro-dureté	76
3.3.4	Micro-dureté et volume de saillie	77
3.4	Piste d'amélioration : ajout d'additifs pour améliorer différentes propriétés des plastiques recyclés	79
3.4.1	Le Talc	79
3.5	Conclusion	81
3.5.1	Ecoulement plastique vs Usure	81
3.5.2	Température de mise en forme	81
3.5.3	PP ou PE ?	83

4 Low tech	85
4.1 Contexte	85
4.2 Le Low Tech et son Impact Social Positif - Retour vers des Technologies Conviviales	88
4.3 Le Low Tech et son Impact Économique - Vers un Nouveau Modèle Économique Soutenable	90
4.4 Éco-design et Low Tech - Alliances pour une Durabilité Accrue . . .	91
4.5 Conclusion	92
5 Conclusion	94
Annexes	95
.1 Premier essai de tribologie	96

0.1 Remerciements

Avant toute chose je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont aidé dans la réalisation de ce mémoire.

En premier lieu, je tiens à remercier mon promoteur, Professeur Thomas Pardoën, pour m'avoir permis de rencontrer Stéphanie et pour m'avoir donné l'opportunité de travailler sur un sujet aussi passionnant que le low-tech.

Je voudrais exprimer ma sincère gratitude à Stéphanie pour le partage de sa passion, pour le temps passé ensemble à réaliser les échantillons, et pour nos nombreuses discussions enrichissantes sur le low tech. Sa passion et son dévouement m'ont inspiré tout au long du travail.

Je souhaite également remercier Florent Hannard pour son soutien quotidien, pour m'avoir aidé dans la plupart des manipulations et pour m'avoir conseillé tout au long du projet. Son expertise et sa disponibilité ont été inestimables.

Je suis également redevable à Naima Sallem pour son aide précieuse dans l'analyse du cycle de vie (LCA).

Je souhaite remercier Michael Coulombier pour son aide dans les différents montages de tribologie.

Je tiens à exprimer ma gratitude à Philippe De Groote pour le temps qu'il a consacré à répondre à mes questions.

Je souhaite également remercier Laurence Ryelandt pour la formation sur le microscope 3D.

Enfin, je tiens à remercier Monsieur le Doyen pour avoir accepté d'être lecteur et membre du jury.

0.2 Glossaire et abréviations

RER : Rest of Europe, indication géographique de la provenance

PP : Polypropylène

kWp : Kilowatt Peak

PE : Polyéthylène

HDPE : High density PE

LDPE : Low density PE

GHG : Green house gases

GWP : Global warming potential

LCA : Life cycle analysis

LCIA : Life cycle impact assesment

LCI : Life cycle inventory

EU27+3 : Europe des 27 plus Norvège Suisse et Royaume Uni

Mt : Million de tonnes métriques

PVC : Polychlorure de vinyle

PS : Polystyrène

Chapitre 1

INTRODUCTION

1.1 Contexte

Ce mémoire se base principalement sur cas fascinant, celui de Stéphanie Germain, fondatrice d’OHPLA. Stéphanie, une véritable artiste dans l’âme et architecte de formation, crée depuis un certain temps des objets de la vie quotidienne à partir de bouchons recyclés de polypropylène (PP) et polyéthylène (PE). Elle le fait dans un atelier spécialement aménagé dans son sous-sol, utilisant des technologies que l’on peut qualifier de ”Low Tech”.

Stéphanie ne se contente pas simplement de recycler ces plastiques, elle leur insuffle une nouvelle vie à travers son approche artistique et esthétique. Elle produit des objets qui sont non seulement fonctionnels, mais aussi beaux à regarder, offrant une valeur ajoutée qui dépasse celle du recyclage classique. Son travail montre que la durabilité et l’art ne sont pas mutuellement exclusifs, mais peuvent se compléter de manière harmonieuse.

Comme son titre l’indique, ce sujet est assez pluridisciplinaire. Il permettra une réflexion à la fois technique, grâce à une analyse de cycle de vie et à l’examen de certaines propriétés mécaniques des plastiques recyclés, mais aussi philosophique, avec une réflexion sur l’avenir de nos technologies et la manière dont nous les utilisons. C’est à travers le travail innovant de Stéphanie Germain que ce mémoire explorera la manière dont les low tech peuvent être utilisées pour transformer notre approche

de la durabilité et de la gestion des déchets dans une perspective créative et pratique.

L'objectif ultime de ce travail est d'apporter un point de vue plus scientifique sur ses procédés, dans le but de l'aider à sélectionner et à optimiser certains paramètres de recyclage. Cette approche aidera Stéphanie à comprendre comment recycler ses bouchons de manière plus efficace et respectueuse de l'environnement, tout en maintenant l'esthétique de ses créations.

1.2 Emergence du Low tech

Définir le low tech n'est pas chose aisée, mais en guise d'introduction on peut tenter de le définir comme ceci en quelques lignes :

Le Low tech est un mouvement qui prône l'utilisation des technologies simples et peu coûteuses plutôt que l'utilisation des technologies de pointe. Le Low tech vise à promouvoir une approche durable et écologique dans la façon de créer, d'utiliser et de recycler différents objets et outils, en mettant l'accent sur la réduction des impacts environnementaux et sur la simplicité plutôt que sur la complexité et la performance maximale. [12]

Dans un monde de plus en plus marqué par l'innovation technologique et la course à la nouveauté, une nouvelle approche émerge : le low tech. Parfois appelé technologie douce, il offre une alternative aux solutions technologiques complexes et énergivores en proposant des innovations simples, durables et accessibles. Cette tendance, popularisée par des penseurs tels que Philippe Bihouix, est en train de gagner du terrain, offrant une perspective rafraîchissante sur notre relation avec la technologie.

Philippe Bihouix, ingénieur spécialiste des sciences de la terre, est l'un des principaux défenseurs du low tech. Dans son ouvrage intitulé "L'Âge des low tech : Vers une civilisation techniquement soutenable", il remet en question notre dépendance

envers les technologies complexes et propose une approche alternative basée sur des solutions simples. Bihouix met en évidence les limites des ressources naturelles et les conséquences environnementales de notre quête incessante d'innovation technologique, tout en offrant des pistes de réflexion sur la manière de repenser notre rapport à la technologie.

[9]

Un exemple concret de la mise en pratique du low tech est le projet "Nomade des Mers". Cette initiative, lancée par Corentin de Chatelperron, explore les solutions low tech pour des problématiques concrètes liées à l'environnement et à la durabilité. À bord d'un catamaran autonome en énergie, l'équipe du Nomade des Mers voyage à travers le monde pour découvrir et partager des innovations low tech. Des techniques de construction écologique aux systèmes de purification d'eau simples, le projet met en lumière la diversité des solutions low tech existantes et démontre leur applicabilité dans différents contextes.

On retrouve également le Low Tech Lab, fondé par le même Corentin de Chatelperron, une organisation qui promeut des solutions simples et durables à travers ses initiatives et projets novateurs. Il se distingue notamment par la création d'une plateforme collaborative qui a pour mission de référencer les initiatives low tech partout dans le monde. Grâce à leur "annuaire" en ligne, le Low Tech Lab recense et documente des centaines d'inventions low tech, facilitant ainsi l'accès aux connaissances et le partage des savoir-faire. Les initiatives du Low Tech Lab couvrent divers domaines tels que l'agriculture, l'énergie, l'habitat ou la mobilité. Par le biais d'ateliers, de conférences et d'événements, il favorise la transmission des compétences et la co-crédation de solutions low tech. [34]

Un autre exemple intéressant est celui du Fairphone, bien qu'il ne rentre pas totalement dans la définition du mouvement low tech, il est important de mentionner cet appareil en raison de ses valeurs et de son approche innovante. Le Fairphone incarne une alternative consciente et éthique dans l'industrie des smartphones en mettant l'accent sur la durabilité, la réparabilité et la responsabilité sociale. Il encourage les utilisateurs à réfléchir à leur consommation technologique et à soutenir

une production plus responsable. Le Fairphone représente ainsi une transition vers des pratiques plus durables, même s'il ne correspond pas entièrement au concept du low tech.

En Europe mais aussi en Belgique, la démarche low tech bourgeoise petit à petit, et Stéphanie et la création d'OHPLA en est un parfait exemple également. L'émergence du low tech est une réponse à la fois aux préoccupations environnementales et à la nécessité de repenser notre modèle de développement technologique. En adoptant une approche low tech, nous pouvons réduire notre empreinte écologique, promouvoir l'autonomie et la résilience des communautés, tout en stimulant l'innovation dans des domaines tels que l'agriculture, l'énergie, la mobilité et la santé. [11] [9]

Dans ce travail, nous explorerons plus en détail les principes fondamentaux du low tech, ses applications pratiques et les défis auxquels il fait face. Nous examinerons également les opportunités qu'il présente pour façonner un avenir plus durable et résilient.

1.3 Propriétés du PP et du PE

Ce mémoire portera surtout sur l'analyse des deux polymères les plus utilisés par Stéphanie, pour cela, il est intéressant d'en faire un rapide résumé de leurs différentes propriétés chimiques et mécaniques.

Le polypropylène (PP) et le polyéthylène (PE) sont deux des polymères les plus couramment utilisés. Ils sont tous deux issus de la famille des polyoléfinés et sont utilisés dans une grande variété d'applications en raison de leurs propriétés distinctes.

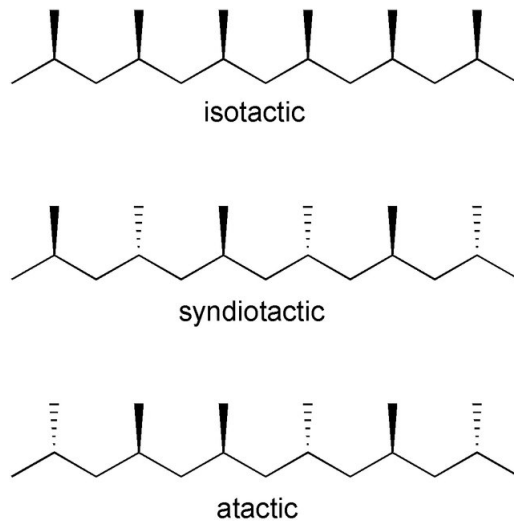


FIGURE 1.1 – Structure du polypropène isotactique, syndiotactique et atactique 24

1.3.1 Thermoplastique

Le PP et le PE font tout les deux parties de la famille des thermoplastiques, c'est à dire qu'ils deviennent plastique par chauffage. Leur cohésion est maintenue par des liaisons secondaires (liaisons de Van der Waals, liaisons dipolaires, pont hydrogène). Ces liaisons secondaires se brisent facilement lorsque la température et donc l'agitation thermique augmente. Les thermoplastiques peuvent présenter deux morphologies différentes, amorphe ou semi cristalline. A température ambiante le PP et le PE se trouvent à l'état caoutchoutique car la température ambiante se situe entre leurs température de transition vitreuse et leur température de fusion.

1.3.2 Polypropylène (PP)

Le polypropylène est un polymère thermoplastique semi-cristallin.



Le polypropylène (PP) existe sous trois formes majeures : isotactique et atactique. Ces trois formes, représentées à la figure 1.1 se distinguent par la disposition spatiale des groupements méthyle ($-\text{CH}_3$).

Le polypropylène isotactique est caractérisé par une structure où tous les substituants méthyle se situent du même côté du plan formé par la chaîne principale.

Cette organisation régulière donne lieu à une structure de chaîne ordonnée, ce qui permet la cristallisation du PP.

À l’opposé, le polypropylène atactique présente une disposition aléatoire des groupements méthyle de part et d’autre du plan formé par la chaîne principale. Cette irrégularité crée une chaîne désordonnée, empêchant la cristallisation du polymère [24].

En fin le polypropylène syndiotactique, une autre forme structurale de ce polymère, dans laquelle les substituants méthyle ($-CH_3$) alternent régulièrement de part et d’autre du plan formé par la chaîne carbonée de la molécule.

Les propriétés physiques et mécaniques du polypropylène dépendent de la tacticité. Le matériau isotactique présente une combinaison de propriétés intéressante : point de fusion élevé, résistance mécanique élevée en raison de la cristallinité, facile à mettre en forme . Ce qui en fait la forme la plus intéressante sur le plan commercial. Le polypropène syndiotactique est un matériau semblable au caoutchouc avec d’autres applications potentielles, tandis que la forme atactique est un matériau collant souvent inutile. [24]

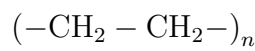
La synthèse du polypropylène s’effectue à travers un procédé appelé polymérisation par coordination, aussi connu comme polymérisation de Ziegler-Natta, du nom de ses inventeurs, Karl Ziegler et Giulio Natta.

Ce processus commence par le propylène, un gaz incolore aux propriétés hautement inflammables, qui agit comme le monomère de base. La polymérisation est réalisée en présence de catalyseurs de Ziegler-Natta, qui sont généralement des composés de titane supportés sur de l’alumine ou du chlorure de magnésium ($MgCl_2$), avec un co-catalyseur à base d’aluminium organométallique. Ces catalyseurs permettent une polymérisation stéréospécifique, c’est-à-dire qu’ils peuvent contrôler la configuration spatiale, permettant la production des trois différentes formes de PP, le PP isotactique, atactique et syndiotactique [3].

La réaction se déroule généralement dans des conditions de température et de pression modérées (50-80°C et 1-40 bar). Dans le réacteur, le catalyseur active la double liaison du propylène, formant un site actif où d'autres molécules de propylène peuvent se lier par une réaction d'insertion, formant ainsi une longue chaîne de polymère. Une fois la chaîne suffisamment longue, la polymérisation est terminée par une réaction de transfert de chaîne ou par une désactivation du site actif du catalyseur [39].

Après la polymérisation, le PP est séparé des autres produits de la réaction, purifié et séché. Il est habituellement converti en granulés pour faciliter le transport et les différentes applications ultérieures.

1.3.3 Polyéthylène (PE)



Le polyéthylène est le polymère le plus couramment utilisé. Il existe en plusieurs formes : PE à basse densité (LDPE, $0.910 - 0.925 \text{ g/cm}^3$), PE à haute densité (HDPE, $0.955 - 0.961 \text{ g/cm}^3$) et le PE à densité linéaire (LLDPE, $0.91 - 0.94 \text{ g/cm}^3$).

Ici, seul le HDPE, le polyéthylène le plus utilisé par Stéphanie, va être développé. Le HDPE est un polymère cristallin et peu amorphe. Il est également fabriqué par polymérisation de l'éthylène, via une catalyse Ziegler-Natta.

Ici la réaction se déroule à des températures modérées (80-300°C) et sous haute pression (1000-3000 atm). [39] [33]

Voici un tableau présentant les propriétés majeurs du PP et du HDPE.

Propriété	Valeur (PP)	Valeur (HDPE)
Résistances chimiques	Aldéhydes, esters, hydrocarbures aliphatiques, cétones, plupart des acides, alcalins, nombreux solvants organiques	Résistant à l'eau, acides dilués, alcalins, une grande variété de solvants
Densité (g/cm ³)	0.90 à 0.91	0.955 à 0.961
Température de fusion(°C)	160 à 163	126 à 135
Température de service (°C)	0 à +100	-73 à 82
Résistance à la traction (N/mm ²)	31.0 à 45.0	23.0 à 29.5
Allongement à la rupture (%)	50 à 145	60 à 135
Dureté (Shore D)	72	55 à 67
Conductivité thermique ($Wm^{-1}K^{-1}$)	0.17 à 0.23	0.35 à 0.49

TABLE 1.1 – Tableau récapitulatif des propriétés du PP et du HDPE [49] [45]

1.4 Recyclage du plastique

1.4.1 Contexte

Lors du siècle dernier, les polymères ont connu un essor industriel sans précédents. A l'heure actuelle ils sont omniprésents, on les retrouve notamment dans la plupart de nos objets de la vie de tous les jours (emballages, meubles, jouets, tableaux de bord, équipements électros ménagers) mais ils sont également utilisé dans le secteur de la construction comme matériau structural (PVC, PE, PS). On les retrouvent également dans d'autres applications plus avancées (aérospatial, médical, électronique). Leur légèreté(masse volumique 2,5x inférieures à celle du verre et du béton et 9x inférieures à celles des alliages) [59] est à l'origine de cet énorme succès. les polymères ont fait l'objet de milliers de recherches afin de palier à leurs majeurs défauts, tels que leur module de Young, leur mauvaise résistance aux solvants. Les chercheurs ont donc travaillé pour améliorer ces propriétés en modifiant, combinant et assemblant monomères et polymères, trouvant des additifs, pour créer des matériaux plus performants. A l'heure actuelle des dizaines de milliers de polymères différents ont déjà été synthétisés.

Les polymères sont en effets devenus omniprésents dans notre société actuelle

car ils possèdent de nombreux avantages, ils sont légers, durables, facile à usiner et moins cher que d'autres produits conventionnels. Cependant certains avantages comme la durabilité transforment ce matériau miracle en une menace pour l'environnement.

En effet, le plastique est l'un des principaux polluants mondiaux, en particulier dans les océans. Les déchets plastiques s'accumulent dans les océans et causent des dommages aux écosystèmes marins, notamment en étouffant et en empoisonnant les animaux marins. « A l'échelle mondiale, on estime aujourd'hui que la quantité de plastique dans les océans est comprise entre 75 à 199 millions de tonnes (ce qui représente 85% des déchets marins), et que 24400 milliards de particules de micro plastiques flotteraient à la surface des océans ». [16]

Le plastique est très difficile à dégrader et peut mettre des centaines, voire des

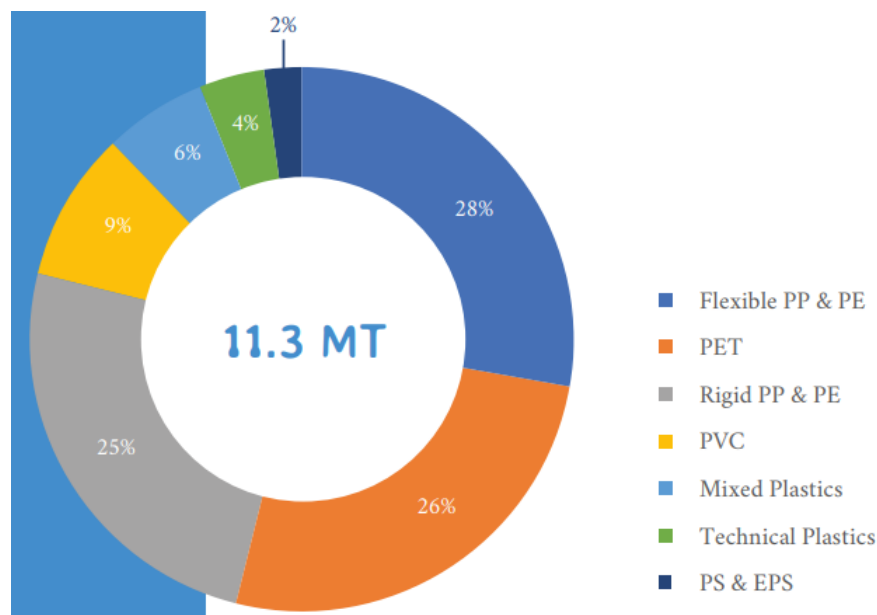


FIGURE 1.2 – Différents plastiques recyclés en Europe au cours de l'année 2021 [46]

milliers d'années à se décomposer dans l'environnement. C'est pourquoi Il est grand temps de se concentrer sur le recyclage de celui-ci. Les deux alternatives principales au recyclage sont l'incinération avec revalorisation énergétique et l'utilisation de polymères biodégradables, solution qui actuellement rencontre des difficultés économiquement parlant. [56]

Dans cette section vous pouvez retrouver un descriptif des techniques actuelles

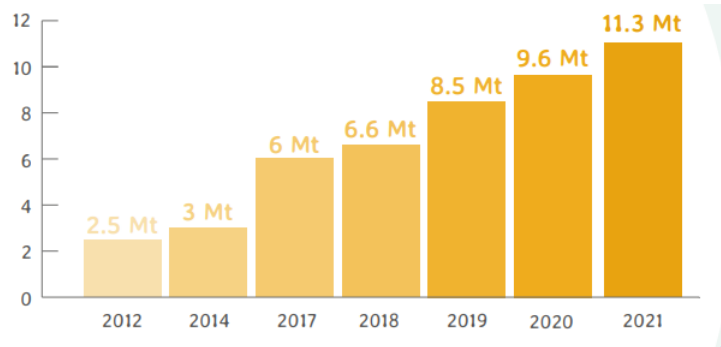


FIGURE 1.3 – Evolution de la capacité de recyclage du plastique en EU27+3^[46]

de recyclages qu’elles soient Low-Tech ou industrielles ainsi que d’autres alternatives au recyclage.

1.4.2 Recyclage Industriel

2021 et le plastique en quelques chiffres

Au cours des dernières années, la production mondiale de plastique a connu une croissance rapide, atteignant environ 368 millions de tonnes en 2021 soit l’équivalent de 11,63t chaque seconde. Malheureusement, seulement 9% de tous les plastiques produits ont été recyclés, tandis que 12% ont été incinérés et 79% ont été mis en décharge ou rejetés dans l’environnement. En comparaison, le taux de recyclage du plastique en Europe est d’environ 30%, tandis qu’aux États-Unis, il n’est que de 9%. La Chine, qui était auparavant le plus grand importateur mondial de déchets plastiques, a interdit l’importation de déchets plastiques en 2018. Cela a entraîné une redistribution des déchets plastiques vers d’autres pays d’Asie du Sud-Est. Les emballages en plastique représentent environ 40% de la demande totale de plastique.^[18]

En Europe(EU27+3), on retrouve plus de 730 usines dédiées au recyclage du plastique avec une capacité totale de recyclage de 11.3 MT en 2021 contre 9.6 MT en 2020. Le recyclage industriel du plastique génère plus de 30 000 emplois et un C.A de pas moins de 8.7 milliards d’euros. Elle collectait environ 29 Mt de déchets plastiques par an et seulement 34.6% de ces déchets ont été recyclés, le reste est soit incinérés pour produire de l’énergie (42%) soit mis en décharge (23.4)^[46]

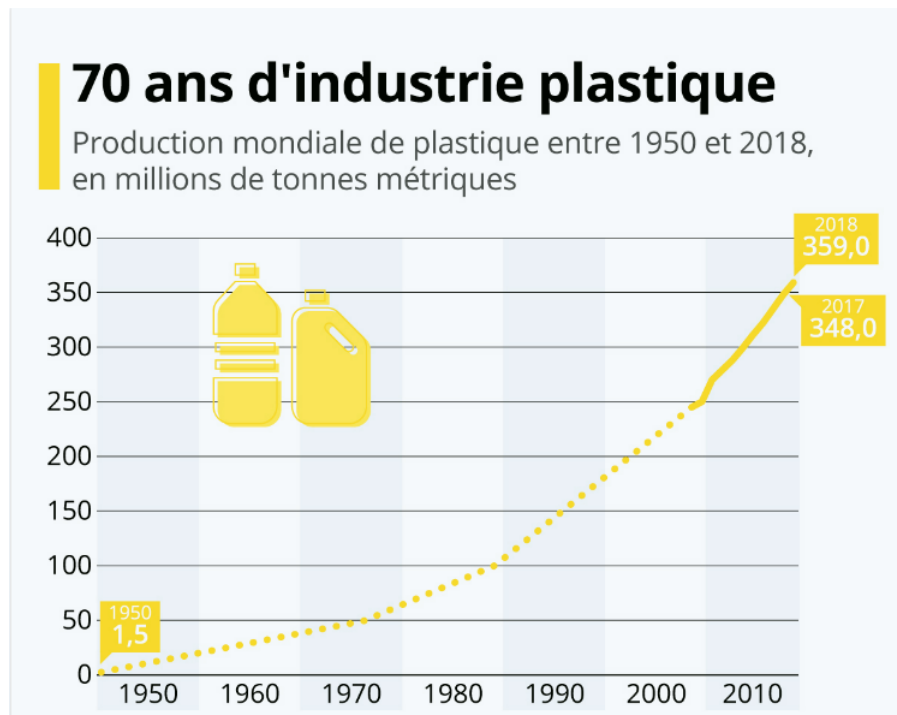


FIGURE 1.4 – Evolution de la production mondiale de plastique au cours des 70 dernières années [58]

On remarque à la figure 1.2 que le PP et PE sont les plus recyclés avec plus 50% de la capacité totale de recyclage. Cette capacité de recyclage en passant de 2.5Mt à 11.3 a quintuplé au cours des 10 dernières années mais celle-ci reste dérisoire par rapport à la quantité de plastique rejetée chaque année. La majeure partie de ces usines de recyclages sont situés en Allemagne (21%), Espagne (16%), Italie (11%) et France (11%). [18]

En Europe, le taux de recyclage du PEHD est d'environ 31,1% et celui du PEBD/PELBD (polyéthylène linéaire basse densité) est d'environ 32,4%. [46]
Le taux de recyclage du PP varie également selon les régions et les types de produits. En Europe, le taux de recyclage du PP est d'environ 21,7%. [42]

Mécanique

Le recyclage des déchets plastiques solides (PSW) par des procédés mécaniques comprend un certain nombre de traitements et d'étapes de préparation. Étant donné le coût et l'intensité énergétique de ce processus, les recycleurs tentent de réduire ces

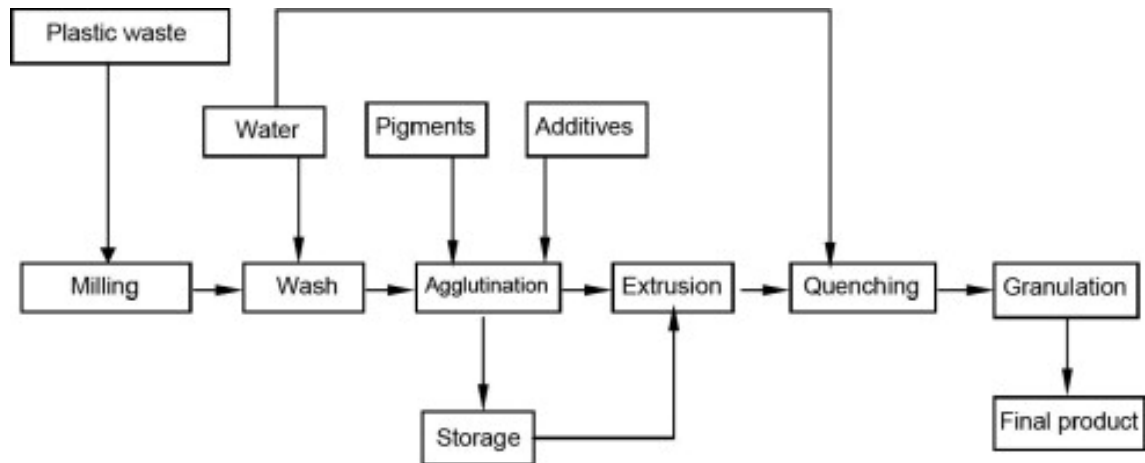


FIGURE 1.5 – Différentes étapes du recyclage mécanique [54]

étapes et le temps de travail autant que possible. En général, la première étape du recyclage mécanique consiste en une réduction de taille du plastique en une forme plus maniable (granulés, poudre ou flocons). Ceci est généralement obtenu par broyage ou déchiquetage.

Le schéma le plus courant a été décrit par Aznar et al. (2006) et comprend généralement les étapes suivantes [7] :

- Découpe/Déchiquetage : Les grandes pièces de plastique sont découpées déchiquetées pour être ensuite traitées en plus petites parties.
- Séparation des contaminants : Le papier, la poussière et autres formes d'impuretés sont séparés du plastique, généralement dans un séparateur cyclonique, appareil qui utilise la gravité et la force centrifuge pour séparer les particules de différentes densités.
- Séparation par flottaison : Les différents types de flocons de plastique sont séparés dans un réservoir de flottaison en fonction de leur densité, par exemple, avec cette technique le PP et PET peuvent être séparés.
- Broyage : Les plastiques une fois triés sont broyés ensemble. Cette étape est généralement la première pour de nombreux recycleurs à travers le monde.
- Pré lavage : Cette étape concerne le début du processus de lavage, le véritable lavage a lieu plus tard si un traitement supplémentaire est nécessaire. Le lavage est principalement effectué à l'eau. Un lavage chimique est parfois utilisé dans certains cas (principalement pour l'élimination de la colle), où de la soude

caustique et des tensioactifs sont utilisés.

- Agglomération : l'agglomération est le processus par lequel les matières plastiques fragmentées sont transformées en agglomérats, qui sont généralement plus faciles à manipuler, à stocker et à transporter. C'est également à cette étape que la coloration et les additifs sont ajoutés.
- Extrusion : L'extrusion est le processus par lequel le plastique est chauffé puis forcé à travers une filière pour créer des fils de plastique, qui sont ensuite coupés en petites billes, ou pellets. Les pellets de plastique sont une forme commune de plastique pour de nombreuses applications, car ils peuvent être facilement fondus et reformés en une variété de produits.
- Trempe : Après l'extrusion, les pellets de plastique sont souvent refroidis par un processus de trempage avant d'être vendu comme produit final.

D'autres PSW mono-polymères passent par des schémas différents. De nombreux mousses (notamment le polyuréthane, PU) sont réduites en poudre et broyées jusqu'à une taille de particule inférieure à 0,2 mm en utilisant d'autres broyeurs (deux cylindres, des broyeurs cryogéniques ou des découpe de précision).

Un autre processus utilisé dans le recyclage mécanique est le re-bonding. Il consiste à mélanger des flocons de mousse de polyuréthane recyclés avec un adhésif, puis à les comprimer pour former un nouveau bloc de mousse. Ces blocs de mousse reconstituée ont généralement une densité plus élevée et une dureté inférieure par rapport à la mousse d'origine, ce qui leur confère de nouvelles propriétés et de nouvelles possibilités d'application. [54] [7]

Chimique

Le recyclage chimique, également appelé recyclage tertiaire, est un ensemble de procédés technologiques avancés qui transforment les matériaux plastiques en molécules plus petites, généralement sous forme de liquides ou de gaz. Ces produits peuvent servir de matière première pour la production de nouveaux produits pétrochimiques et plastiques. Ce type de recyclage est qualifié de chimique car il implique une modification de la structure chimique du polymère.

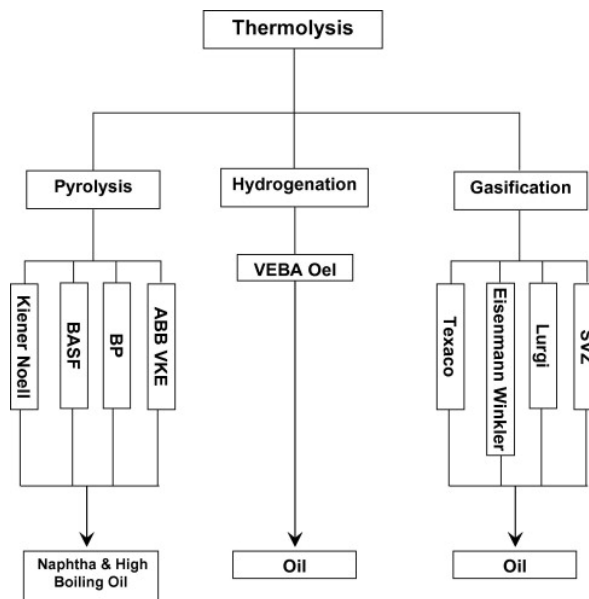


FIGURE 1.6 – Les différents types de thermolyse, les principales technologies actuelles et les principaux produits obtenus [54]

La thermolyse est l'une des méthodes les plus répandues de recyclage chimique. Elle consiste à traiter les déchets plastiques solides sous une chaleur contrôlée sans l'utilisation de catalyseurs. Cette technique peut se décliner en trois sous-processus : la pyrolyse, la gazéification, et l'hydrogénation. [54]

Pyrolyse La pyrolyse est un procédé chimique qui consiste à décomposer les molécules en l'absence d'oxygène à des températures généralement comprises entre 300 et 900 °C. Le polymère subit une augmentation de température qui peut entraîner différentes réactions en fonction de sa nature. Le polymère peut subir une réaction de dépolymérisation, de scission aléatoire de chaînes, ou encore de scission des groupements pendants. La nature des produits obtenus dépend de ces réactions spécifiques. [25]

La pyrolyse conduit généralement à trois fractions principales : une phase gazeuse composée d'hydrocarbures légers, une phase condensable contenant des chaînes plus longues (des cires sont parfois également obtenues, notamment dans le cas de la pyrolyse du polyéthylène), et enfin un résidu solide (également appelé char ou biochar) contenant une grande quantité de carbone. [25]

La pyrolyse des polyoléfines, comme le HDPE et le PP, conduit à la formation d'un mélange complexe de molécules, qui est principalement valorisé sous la forme d'une huile de pyrolyse. Cette huile peut ensuite être traitée et raffinée pour obtenir une base pétrochimique du type naphta ou des polyoléfines à chaînes C5-C10. [25]

Plusieurs entreprises chimiques majeures, dont BASF, Braskem, Clariant, Dow, Ineos, et Sabic, ont investi dans le recyclage chimique et la pyrolyse en particulier. Par exemple, Ineos s'intéresse à la pyrolyse du polystyrène pour permettre un recyclage en boucle fermée. Ces initiatives montrent que la pyrolyse est une voie prometteuse pour le recyclage des plastiques à l'avenir. [54] [15]

Gazéification : Processus qui se situe entre la pyrolyse et la combustion. Les plastiques sont ici convertis en gaz de synthèse combustible appelé syngaz. Ce gaz de synthèse est composé majoritairement de dihydrogène (H₂) et de monoxyde de carbone (CO). **Hydrogénation** : Ici la réaction chimique se fait en présence d'hydrogène et d'un catalyseur. Les liaisons carbone carbone sont brisées et remplacées par des liaisons hydrogène. Le produit de cette réaction est souvent un hydrocarbure liquide (huile).

Ces différentes méthodes de recyclage chimique des déchets plastiques solides montrent des avantages certains, comme la possibilité de traiter des polymères hétérogènes et contaminés avec une préparation limitée. Elles offrent une alternative intéressante aux approches traditionnelles de gestion des déchets, comme l'enfouissement et l'incinération.

1.4.3 Recyclage Low-Tech

Comme mentionné plus haut, les questions du plastique et de son recyclage sont devenues cruciales dans notre société moderne. Avec la production croissante de plastique et les défis environnementaux qui en découlent, des initiatives telles que Precious Plastic ont vu le jour pour aborder cette problématique de manière innovante. Precious Plastic, fondé par Dave Hakkens, est un projet open source qui

propose des solutions pour le recyclage du plastique à petite échelle et qui a grandement inspiré Stéphanie.

Precious Plastic fournit des plans, des tutoriels et des outils pour permettre aux individus et aux communautés de recycler leurs propres déchets plastiques localement. Le projet met l'accent sur le concept de "Do It Yourself" (faites-le vous-même) en fournissant des machines de recyclage du plastique, comme des broyeurs, des extrudeuses et des presses à injection, qui peuvent être construites à partir de matériaux accessibles et abordables. Ces machines permettent de transformer les déchets plastiques en de nouveaux objets utiles, contribuant ainsi à réduire la quantité de plastique qui se retrouve dans l'environnement. [55]

L'approche de Precious Plastic vise également à sensibiliser et à éduquer les gens sur les problèmes liés au plastique et à encourager un changement de mentalité vis-à-vis de sa consommation et de son utilisation. Le projet encourage la réutilisation, le recyclage et la réduction des déchets plastiques à travers des actions concrètes.

Le recyclage du plastique en low tech offre une approche alternative et durable pour gérer les déchets plastiques, en particulier dans les régions où les infrastructures de recyclage avancées sont limitées ou inexistantes. Ces techniques sont généralement simples, peu coûteuses et adaptées à des échelles locales.

Cependant, le recyclage du plastique en low tech présente également des limites et des inconvénients. Parmi eux :

Efficacité et qualité : Les techniques de recyclage en low tech peuvent être moins efficaces et produire des matériaux de qualité inférieure par rapport aux méthodes de recyclage mécaniques et chimiques avancées.

Risques pour la santé et l'environnement : Quand le polypropylène et le polyéthylène sont chauffés, différents types de produits chimiques sont émis, comme mentionné dans les tableaux fournis précédemment. Parmi ces produits, certains peuvent présenter des risques pour la santé :

Température	Produits de dégradation
200°C	Formaldéhyde, acétaldéhyde, C3-C7
220°C	Ethanol, butanol, Acétone, méthyléthylcétone, méthylvinylcétone, Diméthylfurane
240°C	Méthanol, éthanol, isopropanol, butanol, Acétone, méthyléthylcétone, Acide acétique, acide propanoïque, Benzène, xylènes

TABLE 1.2 – Produits de dégradation thermique du PP à différentes températures [48]

Température	Produits de dégradation
190°C	Acétone, méthyléthylcétone, Acide acétique
200°C	Acétaldéhyde, Ethanol, ethoxypropanol
240°C	Tétrahydrofurane

TABLE 1.3 – Produits de dégradation thermique du PE à différentes températures [47]

- Formaldéhyde : C'est un gaz incolore avec une odeur forte et piquante. L'exposition au formaldéhyde peut causer des irritations des yeux, du nez et de la gorge, ainsi que des problèmes respiratoires. À long terme, l'exposition au formaldéhyde est également associée à un risque accru de cancer, notamment de leucémie et de cancer du nasopharynx. [48]
- Acétaldéhyde : Ce produit chimique peut causer des irritations des yeux, de la peau et des voies respiratoires. Il est également considéré comme potentiellement cancérigène pour l'homme. [47]
- Acétone et méthyléthylcétone : Ces solvants peuvent causer des irritations des yeux, de la peau et des voies respiratoires. L'inhalation de concentrations élevées de ces produits chimiques peut également avoir des effets sur le système nerveux central, conduisant à des symptômes comme des maux de tête, des étourdissements et, dans des cas extrêmes, une perte de conscience. [47]
- Benzène et xylènes : Ce sont des hydrocarbures aromatiques qui peuvent avoir des effets toxiques sur le système nerveux central. Le benzène est également reconnu comme une substance cancérigène pour l'homme. [48]

Lors du recyclage de ces plastiques en low tech, il est donc essentiel de prendre des précautions pour minimiser l'exposition à ces émanations toxiques. Cela comprend le travail dans un endroit bien ventilé, l'utilisation d'équipements de protection individuelle appropriés comme le masque filtrant FFA2P3R D utilisé par Stéphanie,

et la minimisation du temps passé à proximité des plastiques chauffés.

Il est intéressant de donner quelques détails concernant le demi-masque 3M™ FFA2P3R D utilisé par Stéphanie. Ce masque peut fournir une protection efficace contre les particules en suspension et certains gaz et vapeurs. La désignation "A2" indique une capacité de protection contre les gaz et vapeurs organiques avec un point d'ébullition supérieur à 65°C, tandis que "P3" indique une protection contre des particules très fines (efficacité de filtration de 99,95%).^[17]

1.4.4 Autres solutions

Polymères dégradables et biosourcés

Les polymères biodégradables et biosourcés sont une alternative intéressante aux plastiques traditionnels dérivés de ressources fossiles et non biodégradables. Les polymères biodégradables sont conçus pour se décomposer naturellement dans l'environnement, tandis que les polymères biosourcés sont fabriqués à partir de ressources renouvelables, comme les plantes ou les microorganismes.

Parmi les exemples de polymères biodégradables et biosourcés, on trouve :

Acide polylactique (PLA) : Fabriqué à partir d'amidon de maïs ou de canne à sucre, le PLA est un polymère biodégradable et compostable couramment utilisé dans les emballages, les ustensiles et les applications biomédicales.

Polyhydroxyalcanoates (PHA) : Les PHA sont produits par des bactéries lors de la fermentation de substrats à base de sucre ou de lipides. Ils sont biodégradables et peuvent être utilisés pour fabriquer des films, des emballages alimentaires et des produits médicaux.

Amidon thermoplastique : Issu de ressources renouvelables, l'amidon thermoplastique est un matériau biodégradable utilisé dans les emballages, les sacs et les produits jetables.

Du point de vue écologique, les polymères biodégradables et biosourcés présentent plusieurs avantages :

Réduction de la dépendance aux ressources fossiles : Les polymères biosourcés contribuent à réduire la consommation de pétrole et de gaz naturel, ce qui diminue les émissions de gaz à effet de serre et l'impact environnemental. [6]

Biodégradabilité : Les polymères biodégradables peuvent se décomposer en éléments naturels, ce qui réduit la quantité de déchets plastiques persistants dans l'environnement.

Cependant, il existe également des défis et des inconvénients associés à l'utilisation de polymères biodégradables et biosourcés. Les deux désavantages majeurs de ces biopolymères sont leurs coûts et performances, ils sont souvent plus coûteux à produire et peuvent présenter des performances inférieures à celles des plastiques traditionnels, ce qui limite leur adoption à grande échelle. [56]

On retrouve un troisième désavantage, ce sont leurs conditions de dégradation, ils nécessitent souvent des conditions spécifiques, comme une température et une humidité élevées, pour se décomposer efficacement. Dans certains environnements, leur dégradation peut être lente ou incomplète. [4]

En conclusion, ces polymères biodégradables et biosourcés semblent offrir un potentiel prometteur pour réduire l'impact environnemental des plastiques. Mais ils sont vite rattrapés par la réalité, une nette amélioration en termes de coût, de performance et de processus de dégradation est nécessaire pour les rendre plus viables économiquement et écologiquement.

Incinération avec revalorisation énergétique

L'incinération avec récupération d'énergie, également appelée recyclage quaternaire, est une méthode de valorisation énergétique des déchets plastiques. Le but de cette méthode est de récupérer la haute valeur énergétique des polymères sous forme de chaleur ou d'électricité en incinérant les déchets plastiques.

Dans de nombreux pays européens, l'incinération avec récupération d'énergie est la méthode la plus courante pour traiter les déchets plastiques, en particulier les déchets mélangés et fortement contaminés, qui ne peuvent pas être recyclés facilement ou économiquement par d'autres méthodes. La teneur en énergie des plastiques les plus courants, y compris les polyoléfines, est comparable à celle du mazout de chauffage. [28]

Cependant, il est important de faire preuve de vigilance lors de l'incinération, car si l'incinération des plastiques est incomplète, des substances toxiques (dioxines, biphenyles polychlorés et furanes - PBDD/F) peuvent être libérées dans l'atmosphère. Ainsi, il est essentiel de contrôler et d'optimiser les conditions d'incinération pour minimiser les émissions nocives. [2]

Les installations d'incinération modernes sont équipées de systèmes de contrôle des émissions et de filtration pour capturer et traiter ces substances toxiques avant qu'elles ne soient libérées dans l'environnement. De plus, des efforts sont déployés pour améliorer l'efficacité énergétique des installations d'incinération et pour développer des technologies de traitement des gaz de combustion afin de réduire davantage les émissions de gaz à effet de serre et les impacts sur la qualité de l'air.

1.5 Propriétés des polyoléfines une fois recyclé

1.5.1 HDPE

Le polyéthylène de haute densité est un thermoplastique largement utilisé dans diverses industries. Toutefois, lorsqu'il est soumis au processus de recyclage, des modifications de ses propriétés mécaniques peuvent survenir.

Les propriétés de traction du HDPE recyclé suivent généralement une tendance de diminution. Ce phénomène est principalement dû à la scission de chaîne et à la réticulation, deux mécanismes qui entrent en compétition lors du retraitement du HDPE. Durant les premiers cycles de recyclage (jusqu'à 10 cycles), c'est le mécanisme de réticulation qui domine, ce qui a pour effet de conserver ou même d'améliorer certaines des bonnes propriétés mécaniques du plastique vierge. Contrairement à d'autres thermoplastiques, le HDPE recyclé présente un poids moléculaire équivalent à celui du HDPE vierge, grâce à ce mécanisme de réticulation. Cela produit un HDPE recyclé avec des propriétés de module d'élasticité et de dureté équivalentes à celles du HDPE vierge. [43] Le degré de cristallisation a également un impact si-

HDPE	Tensile strength (MPa)	33.7	34.2
	Modulus (MPa)	596	640
	Elongation %	69.7	36.9
	Impact strength (ft.lb/in)	2.522	2.201

FIGURE 1.7 – Propriétés du HDPE après recyclage [44]

gnificatif sur les propriétés mécaniques du HDPE recyclé. Au cours des 10 premiers cycles de recyclage, la cristallinité du HDPE recyclé ne change pas. Cependant, une diminution du module d'élasticité est observée lors du 20ème cycle de recyclage, due à un faible degré de cristallisation. [43]

En somme, les propriétés mécaniques du HDPE recyclé dépendent grandement de la dégradation thermique, de la compétition entre la scission de chaîne et la réticulation, du poids moléculaire et du degré de cristallisation. L'interaction de ces différents facteurs conduit à une variété de propriétés mécaniques du HDPE recyclé

Mechanical property	Before recycling	After recycling
Tensile strength (MPa)	34.7 ± 0.22	36.3 ± 0.17
	–	$\sim 34.7 \text{ 1} \times \text{Re}$ $\sim 35.2 \text{ 3} \times \text{Re}$ $\sim 36.1 \text{ 5} \times \text{Re}$
Tensile modulus (MPa)	1704 ± 39	1993 ± 49
	–	$\sim 1708 \text{ 1} \times \text{Re}$ $\sim 1804 \text{ 3} \times \text{Re}$ $\sim 1948 \text{ 5} \times \text{Re}$
Elongation at break (%)	66.37 ± 5.38	51.55 ± 2.2

FIGURE 1.8 – Propriétés du HDPE après recyclage [5]

à chaque cycle de recyclage.

1.5.2 PP

Il est intéressant de noter que la résistance à la traction et le module d'élasticité du PP recyclé sont supérieurs à ceux du PP vierge. Comme pour d'autres thermostoplastiques, le recyclage mécanique provoque également une dégradation thermique dans les plastiques PP, où le poids moléculaire est réduit avec le processus de recyclage. Cependant, la dégradation thermique qui se produit dans les plastiques PP contribue également à l'effet positif d'augmentation de l'indice de cristallinité du PP recyclé.

Cette augmentation explique la différence entre les propriétés de traction montrées par le PP recyclé par rapport aux PP vierge. La rigidité du PP est due à un indice de cristallinité élevé, qui limite la mobilité des chaînes. La structure ordonnée de la région cristalline par rapport à la région amorphe limite le mouvement entre les chaînes cristallines, ce qui fait que le plastique recyclé présente des propriétés de rigidité élevées. La rigidité accrue contribue à l'augmentation de la résistance à la traction et du module d'élasticité du PP recyclé. [43]

Cependant, la flexibilité du plastique PP recyclé diminue en raison de la réduction du mouvement des chaînes. Ainsi, le PP recyclé présente un faible allongement

à la rupture et des valeurs de résistance aux chocs inférieures à celles du PP vierge. En plus de l'indice de cristallisation élevé, le faible poids moléculaire affecte également l'allongement des PP recyclé. La diminution du poids moléculaire conduit à une augmentation du nombre des extrémités de chaîne dans le PP recyclé et a une réduction du nombre de liaisons C-C. Par conséquent, les chaînes plus courtes ont tendance à être moins intégrées dans les zones cristallines du PP, mais aussi moins enchevêtrées. Ces facteurs contribuent à la diminution de la ténacité des plastiques PP recyclés. [43]

Chapitre 2

Analyse de cycle de vie

2.1 Introduction

L'Analyse du Cycle de Vie (ACV) est un outil efficace pour évaluer l'impact environnemental des produits et des procédés, de leur création à leur élimination. Dans le contexte actuel, où l'importance de la durabilité est de plus en plus reconnue, comprendre et quantifier ces impacts est essentiel pour orienter les décisions vers des solutions plus respectueuses de l'environnement.

Le présent chapitre se concentre sur l'évaluation de trois scénarios distincts de valorisation des déchets post-consommateur de polyéthylène haute densité (HDPE), un plastique couramment utilisé dans divers produits de consommation, notamment les bouchons de bouteilles. Le polyéthylène est un matériau durable et recyclable qui, malheureusement, termine parfois son cycle de vie dans les décharges ou par incinération.

Le premier scénario examiné est le recyclage "low tech" opéré par Stéphanie, de bouchons en HDPE ensuite transformés en planches à découper. Ce processus comprend la collecte des bouchons, leur transformation en une planche à découper, puis l'emballage et la distribution du produit final.

Le deuxième scénario est l'incinération du HDPE avec récupération d'énergie. Bien que cette méthode ne permette pas de réutiliser le matériau, elle contribue à

produire de l'énergie ce qui consiste également en une revalorisation.

Enfin, le troisième scénario est le recyclage industriel du HDPE, où le plastique est collecté, traité et transformé en granulés de HDPE prêts à être réutilisés dans la production de nouveaux produits.

Dans cette étude, l'analyse se concentre exclusivement sur le HDPE. Cette décision a été motivée par un désir de simplification de l'analyse, rendant le travail plus clair et plus précis.

De plus, la base de données SimaPro offre des informations plus complètes pour le HDPE par rapport au PP, permettant ainsi une analyse de cycle de vie plus approfondie.

Chacun de ces scénarios offre une approche différente de la gestion des déchets de HDPE, avec des avantages et des inconvénients potentiels. Le but de cette ACV est d'évaluer l'impact environnemental de chacun de ces scénarios, en se concentrant particulièrement sur la question de savoir si le recyclage "low tech" est bénéfique pour l'environnement. En examinant les impacts environnementaux associés à chaque scénario, nous pourrions mieux comprendre et apprécier le rôle de ces différentes approches dans la promotion du Low tech.

Avant de rentrer dans le vif du sujet il est important de définir ce qu'est un LCA (ou ACV en français).

2.2 Définition du Life Cycle Assessment

Le "Life Cycle Assessment" (LCA ou ACV pour analyse du cycle de vie) est une méthode d'évaluation environnementale pour évaluer les impacts environnementaux d'un produit ou d'un service tout au long de son cycle de vie, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à la fin de vie . Il évalue de nombreux critères tels que

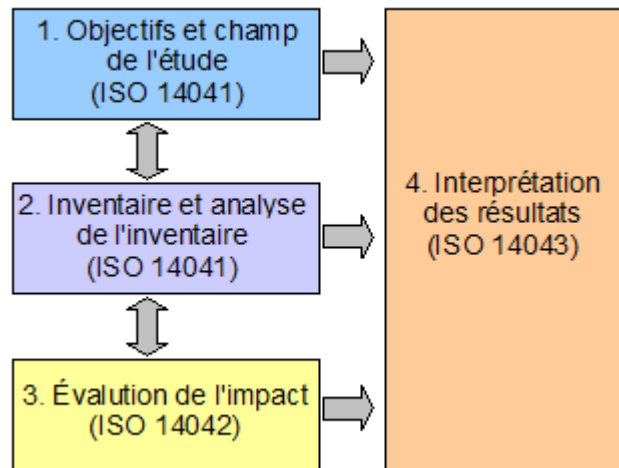


FIGURE 2.1 – LCA Framework

[61]

les impacts environnementaux point de vue de l'énergie, de l'eau, de l'air, des sols et des déchets, mais également les impacts sur la biodiversité et la santé humaine. L'objectif d'un LCA est d'apporter une vision globale sur l'impact environnemental du dit produit ou service et de permettre une comparaison entre différentes solutions pour une décision basé sur l'impact écologique.

Cet outil est utilisé internationalement et est normé depuis 1994 (14040 à 14043). Ces normes ISO permettent de fixer les bases méthodologiques mais aussi déontologiques de l'ACV. Ce qui permet de favoriser différents points comme la comparaison, la fiabilité et la robustesse des résultats, mais une communication des résultats formalisée (critical review ou revue critique). [1]

La définition selon ISO est la suivante : “compilation et évaluation des intrants, des extrants et des impacts environnementaux potentiels d'un système de produits au cours de son cycle de vie” [1]

L'ACV est composé de 4 étapes : [1]

- 1 : Définition de ou des objectifs et du champ d'étude
- 2 : Inventaire du cycle de vie (ICV ou LCI)
- 3 : Evaluation des impacts du cycle de vie (EICV ou LCIA)
- 4 : Interprétation des résultats

2.3 Objectif et champ de l'étude :

L'objectif principal de ce LCA est de comparer le recyclage Low Tech mis en œuvre par Stéphanie pour la fabrication de ses planches à déjeuner, le recyclage industriel et l'incinération avec récupération d'énergie.

Les objectifs de cette analyse du cycle de vie sont multiples. Tout d'abord, identifier les étapes critiques d'un point de vue coût énergétique pour proposer à Stéphanie différentes pistes d'améliorations. Le but ultime de cette analyse est de déterminer si les techniques de recyclage LOW-Tech employées par Stéphanie sont avantageuses d'un point de vue environnementale en comparaison avec d'autres techniques.

Les résultats de cette étude seront bien évidemment communiqués à Stéphanie afin de lui permettre d'avoir un regard plus précis et plus critique sur sa technique de recyclage. Les résultats lui permettront également de modifier, d'optimiser certaines étapes afin de réduire leurs impacts environnementaux. Les résultats seront également présentés dans mon travail de fin d'étude aux membres du jury et aux différents lecteurs.

Voici les deux produits étudiés, d'un côté une planche issue du recyclage industriel et une autre recyclé par OHPLA :



FIGURE 2.2 – Planches produites par Stéphanie



FIGURE 2.3 – Granulés de HDPE recyclé

En suivant les normes ISO il faut définir 3 choses : La fonction , l'unité fonction-

nelle et le flux de références du produit. [1]

Fonction : La fonction d'un produit ou d'un système est l'objectif principal pour lequel il est conçu ou utilisé. Ici, chaque scénario a une fonction principale différente, mais toutes sont liées à la valorisation de 400g de déchets post-consommation de polyéthylène haute densité.

Fonction : "La valorisation de 400g de déchets post-consommation de HDPE".

L'unité fonctionnelle est une mesure clé de l'ACV car elle fournit une base de comparaison entre les différents systèmes analysés. C'est une description quantitative de la fonction principale du système, et tous les flux d'entrée et de sortie sont liés à cette unité fonctionnelle.

Dans ce cas, trois scénarios différents sont comparés pour la valorisation des déchets post-consommateur HDPE. Il est donc important que l'unité fonctionnelle reflète cela.

Unité fonctionnelle : La gestion de 400g de déchets post-consommation de HDPE.

Flux de références : 400g de déchets post-consommation de HDPE"

Ce flux de référence signifie que tous les impacts environnementaux seront calculés et comparés pour cette quantité spécifique de HDPE. Par conséquent, chaque scénario sera évalué en fonction de la façon dont il gère 400g de déchets post-consommation de HDPE, qu'il s'agisse du recyclage "low tech", de l'incinération avec récupération d'énergie ou du recyclage industriel.

Le logiciel choisie pour cette analyse de cycle de vie est SimaPro. Celui-ci apporte une grande flexibilité lors de l'analyse. Il permet de modéliser des scénarios de manière détaillée et de les comparer facilement, ce qui en fait un outil particulière-

ment efficace et utile pour des cas spécifiques.

2.4 EcoInvent 3 comme base de données

Ecoinvent est l'une des bases de données les plus largement utilisées et respectées en ACV. Elle fournit des informations détaillées et de haute qualité sur les impacts environnementaux de milliers de produits, processus et services.

La version 3 d'Ecoinvent offre plusieurs avantages par rapport à ses prédécesseurs et à d'autres bases de données. Premièrement, elle couvre un large éventail de processus, ce qui permet une analyse plus complète et détaillée. Deuxièmement, Ecoinvent 3 est constamment mise à jour, garantissant ainsi l'actualité et la pertinence des informations qu'elle contient. Enfin, Ecoinvent 3 offre une transparence accrue en ce qui concerne les méthodologies et les sources de données utilisées, ce qui facilite l'interprétation des résultats de l'ACV.

en annexe le détail de chaque process et données

2.5 ILCD2011+ comme méthode de calcul

L'ILCD (International Reference Life Cycle Data System) est une méthode d'analyse des impacts environnementaux qui a été développée par la Commission Européenne.

La version 2011+ de ILCD offre une méthodologie robuste, largement reconnue et acceptée pour l'ACV. Elle comprend une variété de catégories d'impact environnemental, y compris les changements climatiques, la destruction de la couche d'ozone, la toxicité humaine, la toxicité écotoxicologique, l'épuisement des ressources, et bien d'autres.

En particulier, elle est fréquemment utilisé dans les ACV portant sur le recyclage. Sa méthodologie permet une évaluation précise et détaillée des impacts environnementaux associés à différents scénarios de gestion des déchets, y compris le recyclage

et l'incinération.

Enfin, cette base de donnée est continuellement mise à jour pour tenir compte des avancées dans la recherche en ACV. Par conséquent, l'utilisation de l'ILCD 2011+ pour cette analyse garantit que votre étude est conforme aux meilleures pratiques actuelles en matière d'ACV, en particulier dans le contexte du recyclage.

2.6 Gate to Gate

Il existe plusieurs façon d'effectuer une analyse de cycle de vie :

- **Cradle to Gate** : De l'extraction des matières premières (cradle = berceau) jusqu'à la sortie d'usine (la porte = gate) .
- **Cradle to Grave** : De l'extraction jusqu'à la fin de vie (grave = tombe). On a donc ici une prise en compte de l'utilisation du produit, de sa distribution et de sa fin de vie.
- **Cradle to Cradle** : La forme la plus complète qui consiste à prendre également en compte la revalorisation des déchets (recyclage etc.).
- **Gate to Gate** : C'est celle ci qui sera utilisée dans cette analyse. On prend en compte ici, l'acquisition des matières premières jusqu'à une forme valorisé du PP. Cela inclut bien évidemment toutes les étapes nécessaires pour transformer les matières premières en un produit fini, y compris les processus de recyclage, de fabrication, etc.

2.7 Géographie

Lors de la réalisation d'un LCA il est essentiel de se rapprocher au maximum des conditions spécifiques du pays ou de la région à l'étude afin d'obtenir des résultats aussi précis que possible.

Dans le cadre de cette étude, l'objectif était de se baser autant que possible sur des données belges. En effet, les conditions environnementales, les technologies uti-

lisées, les systèmes de gestion des déchets et le mix énergétique en Belgique peuvent différer de ceux d'autres pays ou régions, ce qui peut avoir un impact significatif sur les résultats de l'ACV. Par exemple pour le scénario d'incinération avec récupération d'énergie, les données d'uvélia ont été prises en compte.

Lorsque des données spécifiques à la Belgique n'étaient pas disponibles, des données provenant de l'Europe (RER pour "Rest of Europe") ont été utilisées. Ces données sont probablement plus représentatives des conditions belges que les données provenant d'autres régions du monde.

Dans certains cas où ni les données belges ni les données européennes n'étaient disponibles, des données suisses (CH) ou du reste du monde (ROW) ont été utilisées. Il convient de noter que l'utilisation de ces données peut introduire une certaine incertitude dans les résultats de l'ACV. Cependant, cela a été jugé préférable à l'omission de ces aspects de l'analyse.

Ces choix dans la sélection des données ont été faits dans le but d'assurer la pertinence et la précision des résultats de l'ACV pour le contexte belge.

2.8 Inventaire du cycle de vie

C'est dans cette partie qu'on va citer et quantifier tous les flux entrants et sortants des deux systèmes avec un chaque fois un diagramme de flux illustrant ceux-ci.

Le logiciel choisie pour cette analyse de cycle de vie est SimaPro. Celui-ci apporte une grande flexibilité lors de l'analyse. Il permet de modéliser des scénarios de manière détaillée et de les comparer facilement, ce qui en fait un outil particulièrement efficace et utile pour des cas spécifiques.

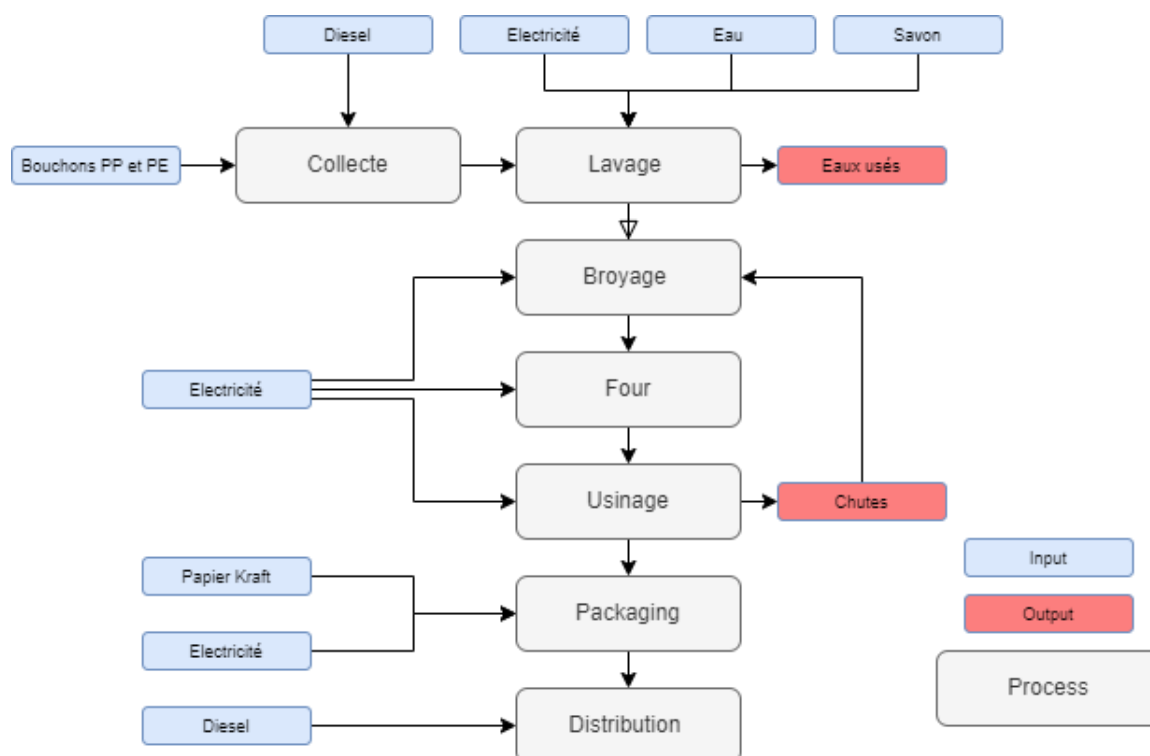


FIGURE 2.4 – Diagramme des flux pour une planche OHPLA

2.8.1 Recyclage LOW-TECH

Analysons tout d’abord les flux entrants et sortants pour le recyclage low-tech.

Pour ce scénario, certaines considérations spécifiques ont été prises en compte pour établir les limites du système. En particulier, il est à noter que la production et la fin de vie des appareils utilisés pour le recyclage ne sont pas prises en compte dans cette ACV.

La raison de cette exclusion est que la plupart de ces appareils sont soit récupérés, soit déjà en possession de Stéphanie. En d’autres termes, ces appareils n’ont pas été achetés ou produits spécifiquement pour l’opération de recyclage, mais étaient déjà disponibles. Par conséquent, les impacts environnementaux associés à leur production et à leur fin de vie ne sont pas pris en compte dans le cadre de cette étude.

Il convient de souligner que cette approche peut entraîner une sous-estimation des impacts environnementaux du scénario de recyclage ”low tech”. Cependant, elle



FIGURE 2.5 – Stockage et tri des bouchons dans l’atelier de Stéphanie

reflète de manière précise le scénario tel qu’il a été mis en œuvre dans la pratique. Elle illustre également l’approche de recyclage ”low tech” qui met l’accent sur l’utilisation de ressources existantes et la minimisation de la consommation de nouveaux matériaux et appareils.

Collecte

La première étape du processus est la collecte des bouchons. Habituellement, ce sont des amis ou des membres de la famille de Stéphanie qui lui apportent les bouchons directement à son domicile. Il est crucial de souligner que ces déplacements ont généralement plusieurs objectifs. Les proches de Stéphanie ne se déplacent pas uniquement pour lui apporter des bouchons, une telle démarche serait en contradiction avec l’approche low tech adoptée par Stéphanie, et diminuerait la pertinence de son travail. Par conséquent, ces déplacements ne seront pas inclus dans l’analyse.

Le seul déplacement pris en compte pour la collecte est un trajet hebdomadaire aller-retour que Stéphanie effectue entre son domicile et Braine-l’Alleud, où elle récupère des bouchons dans une petite boutique en vrac. Elle parcourt 47 km à bord d’une Volvo V60 Diesel, immatriculée en 2014.

Il est complexe de quantifier le nombre de bouchons collectés par kilomètre, étant donné que la quantité récupérée varie à chaque visite et que ces bouchons ne constituent qu'une fraction de l'approvisionnement total en matières premières. Pour cette étude, nous supposons qu'elle collecte 60 kg de bouchons par trajet. Il est important de noter que cette estimation est approximative, car une grande partie des bouchons qu'elle utilise provient de ses proches. Données correspondantes dans SIMAPRO : *"Transport, passenger car, medium size, diesel, EURO 5 RER/transport, passenger car, medium size, diesel, EURO 5 / Cut-off, S"* 60 kg pour 47km.

Lavage

La seconde étape du processus implique le nettoyage des bouchons. Pour ce faire, Stéphanie utilise un lave-vaisselle domestique classique, en sélectionnant un cycle "éco" de 20 minutes. Ce cycle permet de nettoyer environ 1,5 kg de bouchons. On estime que chaque cycle consomme environ 8 litres d'eau, 0,8 kWh d'électricité et 10 grammes de savon, quantités suffisantes pour nettoyer 1,5 kg de bouchons.

Il est à noter que l'électricité utilisée dans la maison de Stéphanie provient d'une installation photovoltaïque polycristalline de 5 kWc (kilowatt-crête). Cette valeur, le kWc, représente la capacité maximale de l'installation à générer de l'énergie dans des conditions idéales.

Données correspondantes dans SIMAPRO :

- *Electricity, low voltage BE/ electricity production, photovoltaic, 3kWp slanted-roof installation, multi-Si, panel, mounted / Cut-off, S*
- *Soap RER/ production / Cut-off, S*
- *Tap water Europe without Switzerland/ tap water production, conventional treatment / Cut-off, S*



FIGURE 2.6 – Broyeur Low tech



FIGURE 2.7 – Broyeur

Broyage

Après lavage, les bouchons sont traités à l'aide d'un broyeur conçu par Stéphanie. Ce broyeur est alimenté par un petit moteur électrique d'une puissance de 2200 W. En l'espace de 10 minutes, il permet la production moyenne de 400 grammes de flocons de PP ou de PE. L'électricité nécessaire pour cette opération provient également de son installation photovoltaïque. En prenant en compte le temps d'utilisation et la puissance du moteur, la consommation moyenne d'énergie pour cette étape s'élève à $2,2kW * 0.16h = 0.352kWh$.



FIGURE 2.8 – Granules de PP et HDPE obtenus après broyage

Mise en forme

Une fois les flocons de plastique obtenus, ceux-ci sont placés dans un moule en acier, revêtu d'une feuille de Téflon pour réduire l'adhérence. Les deux plaques du moule sont serrées avec un écrou papillon. Ensuite, Stéphanie insère une plaque à la fois dans un four de cuisine conventionnel, préchauffé à 225°C , pendant une durée de 30 minutes. Après un préchauffage de 20 minutes, le four est utilisé pour la production de trois planches. L'électricité nécessaire au fonctionnement du four provient également de l'installation photovoltaïque de Stéphanie.

Une fois sorties du four, les plaques sont compressées pendant 30 minutes à l'aide d'un petit cric hydraulique. Il convient de noter que la fabrication de la presse n'est pas prise en compte dans cette analyse.

On estime la consommation d'énergie du four à 0.75kWh . Pour produire une planche, le four est utilisé pendant environ 36,6 minutes, ce qui correspond à une consommation énergétique de : $0.75 * 0.61 = 0.45750\text{kWh}$.



FIGURE 2.9 – Moule en acier

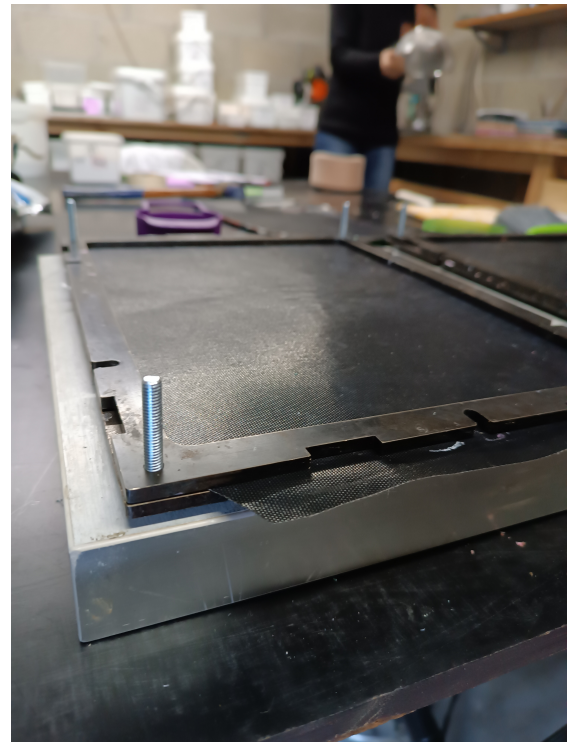


FIGURE 2.10 – Moule en acier serré par un écrou papillon

Usinage

Après la sortie de la presse, la plaque est retravaillée à l'aide de divers outils tels qu'une petite ponceuse et une scie électrique. La consommation électrique de ces appareils a été calculée à partir d'une estimation moyenne d'utilisation de 5 minutes par appareil pour chaque planche.

Packaging

Une fois le produit fini, Stéphanie adopte une approche minimaliste pour l'emballage. Elle utilise du papier kraft, comme illustré dans la figure [à insérer]. En moyenne, elle utilise environ 10 grammes de papier Kraft par planche.



FIGURE 2.11 – Produits finis

Données correspondantes dans SIMAPRO : *Kraft paper RER/ kraft paper production / Cut-off, S*

2.8.2 Recyclage industriel

Il est important de souligner que le processus de valorisation des déchets de polyéthylène débute dès la collecte de ces derniers. Le processus se poursuit à travers les étapes de tri, de lavage et de broyage, jusqu'à l'obtention de granulés de PEHD.

Il est essentiel de noter que la valorisation de ces déchets se termine aux portes de l'usine, une fois les granulés de PEHD produits. Ces granulés servent alors de matière première pour la fabrication de nouveaux produits, les différentes étapes de transformation de la matière premières ici ne sont pas prises en compte dans l'ACV.

Collecte et tri : En premier lieu, les déchets de polyéthylène sont rassemblés et classés en fonction de leur catégorie (PEHD, PEBD) et de leur couleur. Ce triage peut être effectué manuellement ou via des machines automatisées, comme les séparateurs par courants de Foucault ou les systèmes de tri optique. [27]

Lavage : Les déchets de PE triés subissent ensuite un lavage pour retirer les contaminants, comme la saleté, les résidus alimentaires et les étiquettes. Ce processus de lavage peut se faire via un système de lavage par friction ou par flottaison. [54]

Broyage et granulation : Les déchets de PE lavés sont réduits en petits fragments ou flocons. Ces derniers sont par la suite transformés en granulés de plastique par extrusion. Ces granulés de PE sont cruciaux pour le procédé de moulage par injection. [51]

2.8.3 Incinération

L'incinération est un processus de traitement des déchets qui consiste à brûler des substances organiques en présence d'oxygène. Lors de la combustion, l'énergie stockée dans les liaisons chimiques des déchets est libérée sous forme de chaleur. Dans le cas du polyéthylène haute densité, cette énergie est assez significative et peut être récupérée pour produire de l'électricité ou de la chaleur pour le chauffage urbain.

En Wallonie, il existe un incinérateur de ce type à Herstal appelé UVELIA. Il est intéressant de résumer en quelques lignes les données intéressantes de ce site.

Uvelia

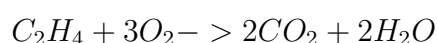
UVELIA produit plus de 240 millions de kWh d'énergie par an, ce qui équivaut à la consommation énergétique annuelle de 54 000 ménages. Le processus d'incinération commence par le tri des matériaux recyclables (PMC) à Seraing. Les déchets qui ne peuvent pas être recyclés sont ensuite incinérés à Herstal à des températures allant de 900 à 1100 °C.

Les cendres résultantes, appelées mâchefers, sont collectées et transportées par bateau pour être traitées. Elles sont ensuite utilisées comme sous-couche dans la construction de routes et de chemins de fer, offrant une solution de gestion durable pour ces résidus.

L'incinérateur UVELIA dispose également d'un système de traitement des fumées. Les fumées sont d'abord traitées par un électrofiltre, qui permet d'éliminer 90% des particules de poussière. Elles sont ensuite traitées par une déNOx catalytique pour réduire les émissions d'oxydes d'azote. Enfin, une tour d'atomisation capte les dioxines et les furanes restants. Les fumées maintenant épurées peuvent être ensuite rejetées. [32]

Estimation de l'énergie récupéré par la combustion de HDPE

Le pouvoir calorifique inférieur (PCI) d'un combustible est la quantité d'énergie thermique dégagée par la combustion complète d'une unité de masse de ce combustible, moins l'énergie utilisée pour vaporiser l'eau produite lors de la combustion. L'eau est un produit de la combustion de la plupart des combustibles organiques, y compris le polyéthylène. [23]



Chaque molécule de C_2H_4 réagit avec trois molécules d'oxygène pour produire deux molécules de dioxyde de carbone et deux molécules d'eau. L'énergie dégagée

par cette réaction est égale à la différence entre l'énergie des liaisons chimiques dans les réactifs C_2H_4 et O_2 et l'énergie des liaisons dans les produits CO_2 et H_2O . [62]

Cependant, l'eau produite par la combustion est présente à l'état de vapeur, en raison des températures élevées impliquées. La transformation de l'eau de l'état liquide à l'état gazeux consomme de l'énergie (la chaleur de vaporisation). Par conséquent, le PCI du combustible est calculé en soustrayant cette énergie de l'énergie totale dégagée par la combustion. [14]

Pour le HDPE, le PCI est d'environ 44 MJ/kg. Cela signifie que la combustion complète de 1 kg de HDPE libère environ 44 MJ d'énergie thermique. Cependant, une partie de cette énergie est consommée pour vaporiser l'eau produite par la combustion. [14]

À l'usine d'incinération d'Uvéla à Herstal, l'énergie dégagée par l'incinération est récupérée avec un rendement estimé de 22%. Ainsi, pour 1 kg de HDPE incinéré à Uvéla, l'énergie nette récupérée serait de :

$$1kg * 46MJ/kg * 0,22 = 10,12MJ$$

Il est important de noter que cette estimation est assez simplifiée. Pour une analyse plus précise, des informations spécifiques sur les conditions de combustion à l'usine d'Uvéla seraient nécessaires.

2.9 LCIA

2.9.1 Choix des impacts analysés

Pour chaque scénario les catégories d'impacts environnementaux suivantes ont été examinées :

Changement climatique : Cette catégorie mesure les émissions de gaz à effet de serre qui contribuent au réchauffement climatique, comme le dioxyde de carbone

(CO₂), le méthane (CH₄) et l'oxyde nitreux (N₂O).

Toxicité humaine - Effets non cancérigènes : Cette catégorie vise à évaluer les effets potentiels sur la santé humaine des substances libérées lors des processus examinés, à l'exception des effets cancérigènes. Ces effets non cancérigènes peuvent englober divers problèmes de santé, affectant par exemple le système nerveux, la reproduction, le développement ou le système immunitaire.

Toxicité humaine - Effets cancérigènes : Cette catégorie mesure l'impact potentiel des substances libérées qui sont connues pour être cancérigènes.

Écotoxicité en eau douce : Cette catégorie évalue l'impact potentiel des substances libérées sur les organismes vivant dans des environnements aquatiques d'eau douce.

Rayonnement ionisant HH (pour les êtres humains) : Cette catégorie mesure l'impact potentiel des substances radioactives libérées sur la santé humaine.

Cette sélection de catégories d'impact a été guidée par leur pertinence dans le contexte des trois scénarios. Les autres catégories d'impact, bien que pertinentes dans une approche globale de l'ACV, présentent des niveaux d'impact relativement faibles dans le cas des scénarios analysés, et ont donc été écartées de l'analyse. Cette approche permet de se concentrer sur les impacts environnementaux les plus significatifs et pertinents, améliorant ainsi l'efficacité et la pertinence de l'ACV.

2.9.2 Normalisation

L'analyse des résultats normalisés est une étape de l'ACV qui permet de mettre en perspective les impacts environnementaux identifiés. Les résultats normalisés sont obtenus en divisant l'impact d'une activité par un facteur de normalisation. Ce facteur représente l'impact environnemental total dans une région donnée (par exemple, un pays ou le monde entier) pour une année de référence. [8]

La normalisation offre plusieurs avantages. Premièrement, elle permet de comparer les impacts dans différentes catégories. Par exemple, il peut être difficile de comparer directement l'impact sur le changement climatique et l'écotoxicité en eau douce, car ces impacts sont mesurés dans différentes unités et ont des effets différents sur l'environnement. La normalisation permet de rendre ces impacts comparables en les rapportant à un impact de référence commun.

Deuxièmement, la normalisation aide à identifier les impacts qui sont particulièrement importants dans le contexte régional ou mondial. Par exemple, un impact qui semble petit dans l'absolu peut être important si cet impact est relativement grand par rapport à l'impact total dans la région de référence.

Dans le cas de l'ILCD 2011 midpoint+, les facteurs de normalisation sont basés sur les impacts environnementaux estimés en Europe pour une année de référence. Les impacts sont normalisés par rapport à ces valeurs de référence pour donner une idée de l'importance relative de chaque impact dans le contexte européen. [8]

Il est important de noter que la normalisation ne doit pas être utilisée pour déterminer si un impact est "acceptable" ou non. Les impacts normalisés sont simplement une mesure de l'importance relative des impacts et doivent être interprétés en conséquence.

2.9.3 Scénario 1 : Recyclage industriel

Changement climatique

4,31E-05 indique un impact relatif relativement faible sur le changement climatique. Cela peut s'expliquer par la nature du recyclage industriel qui, s'il est réalisé de manière efficiente, peut réduire les émissions de gaz à effet de serre en diminuant la production de nouveaux plastiques.

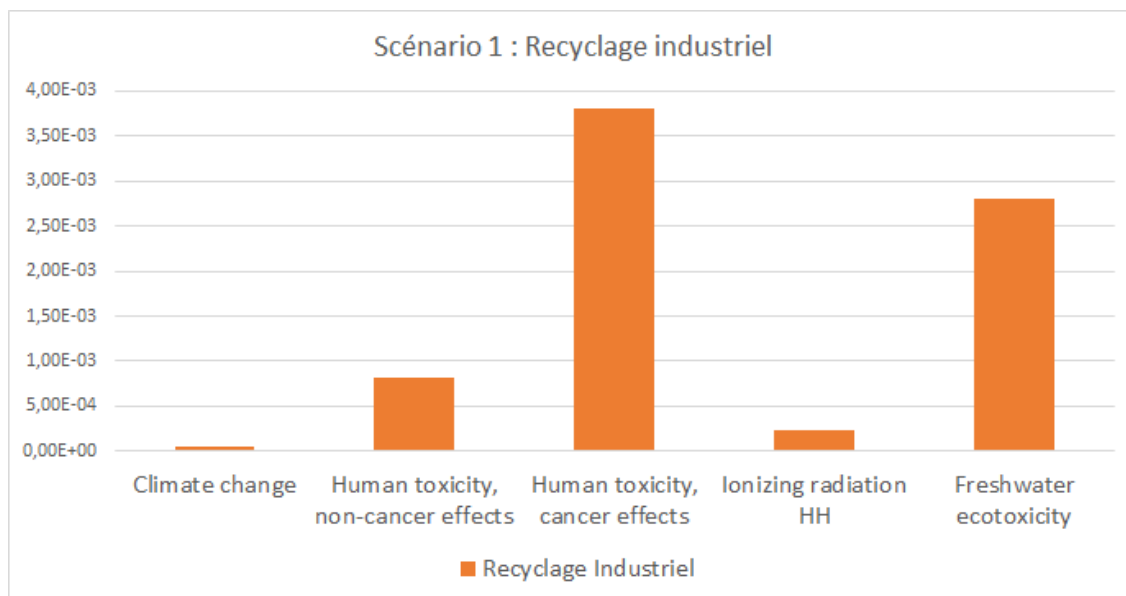


FIGURE 2.12 – Résultats ACV scénario 1

Toxicité humaine - Effets non cancérigènes

0,000821119 montre également un impact relativement faible sur cette catégorie. Les processus de recyclage industriel peuvent libérer certaines substances nocives, mais si les réglementations de sécurité et environnementales sont respectées, cet impact peut être contrôlé.

Toxicité humaine - Effets cancérigènes

0,003806598 cette valeur est significative. Elle indique que les substances cancérigènes peuvent être produites lors du processus de recyclage industriel. Cela pourrait être dû à l'exposition à certains produits chimiques utilisés dans le processus de recyclage ou à la décomposition de certains types de plastiques.

Rayonnement ionisant HH (HH pour Human Health)

0,000234017 indique un impact relativement faible dans cette catégorie. Le recyclage industriel n'est généralement pas associé à des niveaux élevés de rayonnement, à moins que certains matériaux recyclés ne contiennent des substances radioactives.

Écotoxicité en eau douce

0,002812286 suggère un impact notable dans cette catégorie. Cela pourrait être dû à la libération de substances toxiques dans l'eau lors du processus de recyclage, soit directement par les eaux usées, soit indirectement par le ruissellement ou l'érosion.

2.9.4 Scénario 2 : Recyclage Low-Tech

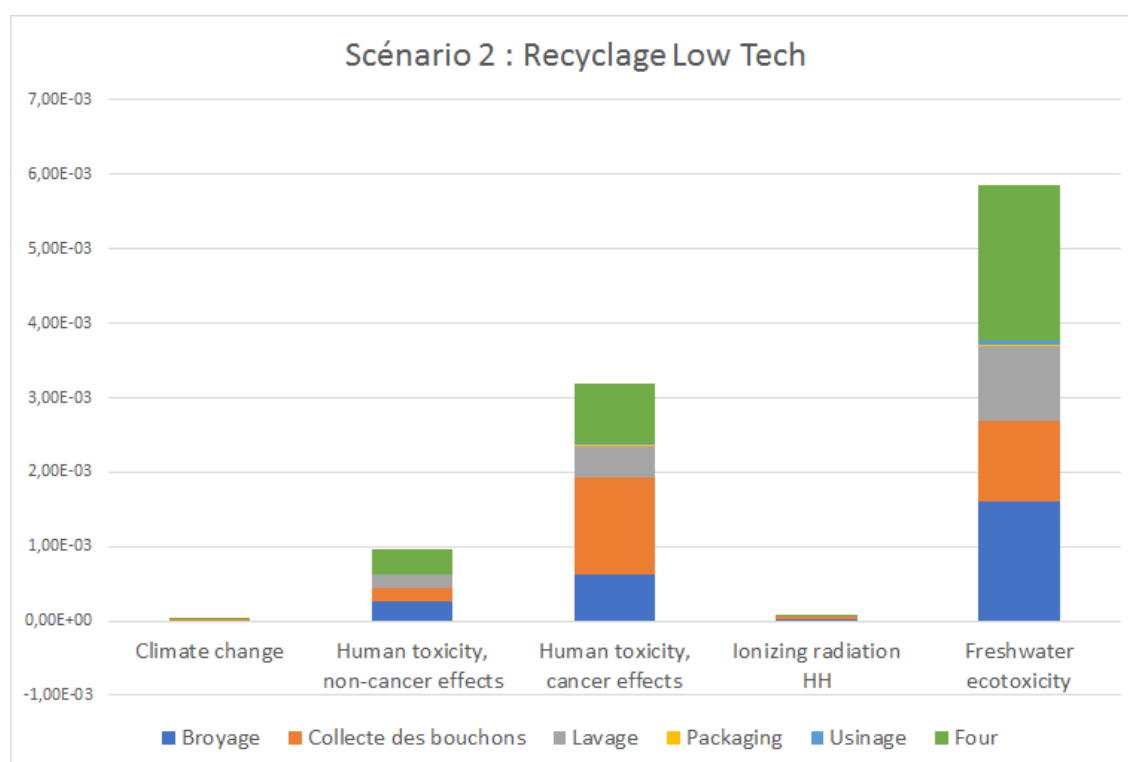


FIGURE 2.13 – Résultats ACV scénario 2

Dans le scénario 2, nous pouvons observer que les différentes étapes du processus de recyclage ont des impacts différents sur les différentes catégories d'impact environnemental.

Changement climatique

L'étape de collecte des bouchons est la plus significative. Cette contribution est principalement attribuée à l'utilisation d'un véhicule diesel pour le transport, qui consomme des combustibles fossiles et émet du dioxyde de carbone.

Toxicité humaine - Effets non-cancérigènes

C'est l'étape du four qui semble avoir le plus grand impact. L'intense consommation d'électricité durant cette étape pourrait être à l'origine de cet effet.

Toxicité humaine - Effets cancérigènes

C'est encore l'étape de collecte des bouchons qui présente le plus grand impact. La cause principale serait les émissions potentielles de substances cancérigènes résultant de l'utilisation d'un véhicule diesel Euro 5 pour le transport.

Rayonnement ionisant HH (HH pour Human Health)

Faiblement présent, justifiable par le fait que toute l'électricité provient de l'installation photovoltaïque.

Écotoxicité en eau douce

L'impact est considérable sur les écosystèmes aquatiques. Les étapes de broyage, de lavage et du four sont les principales sources de cet impact. Ces trois étapes sont associés à une consommation d'électricité importante.

Dans l'ensemble, ces résultats suggèrent qu'une attention particulière devrait être portée à l'amélioration de l'efficacité énergétique et à la réduction des émissions toxiques lors de la collecte des bouchons et de l'étape du four pour minimiser l'impact environnemental global du processus de recyclage.

2.9.5 Scénario 3 : Incinération avec récupération d'énergie

Dans le scénario 3, deux principaux facteurs sont examinés : l'électricité et l'incinération des déchets plastiques. Notons que l'électricité est ici considérée comme un produit évité, ce qui signifie que la production d'électricité à partir du processus d'incinération contribue à réduire la demande en électricité provenant d'autres sources.

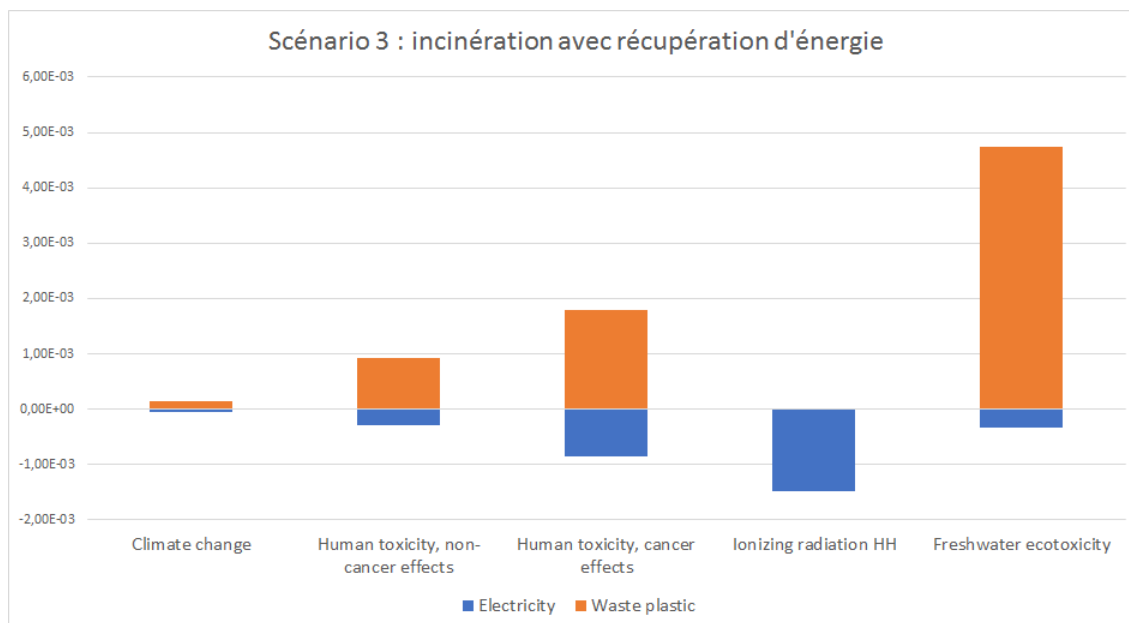


FIGURE 2.14 – Résultats ACV scénario 3

Changement climatique

L'incinération de déchets plastiques pour la production d'électricité présente un impact normalisé de 0,000134616 ce qui est supérieur à l'impact de l'électricité évitée (-0,000043). Cela est principalement dû à l'émission de gaz à effet de serre, tels que le dioxyde de carbone et le méthane, lors de l'incinération des déchets plastiques.

Toxicité humaine - Effets cancérigènes et non cancérigènes

L'incinération des déchets plastiques présente un impact significatif dans ces catégories, avec des valeurs normalisées respectives de 0,000930966 et 0,001793525. Ceci pourrait être dû à l'émission de polluants toxiques lors de l'incinération, y compris des dioxines et des métaux lourds, qui peuvent avoir des effets néfastes sur la santé humaine.

Rayonnement ionisant HH (HH pour Human Health)

Pour cette catégorie, l'électricité évitée présente un impact négatif important (-0,001493305), ce qui suggère que le processus d'incinération des déchets plastiques évite la production d'électricité via d'autres moyens, tels que les centrales nucléaires.

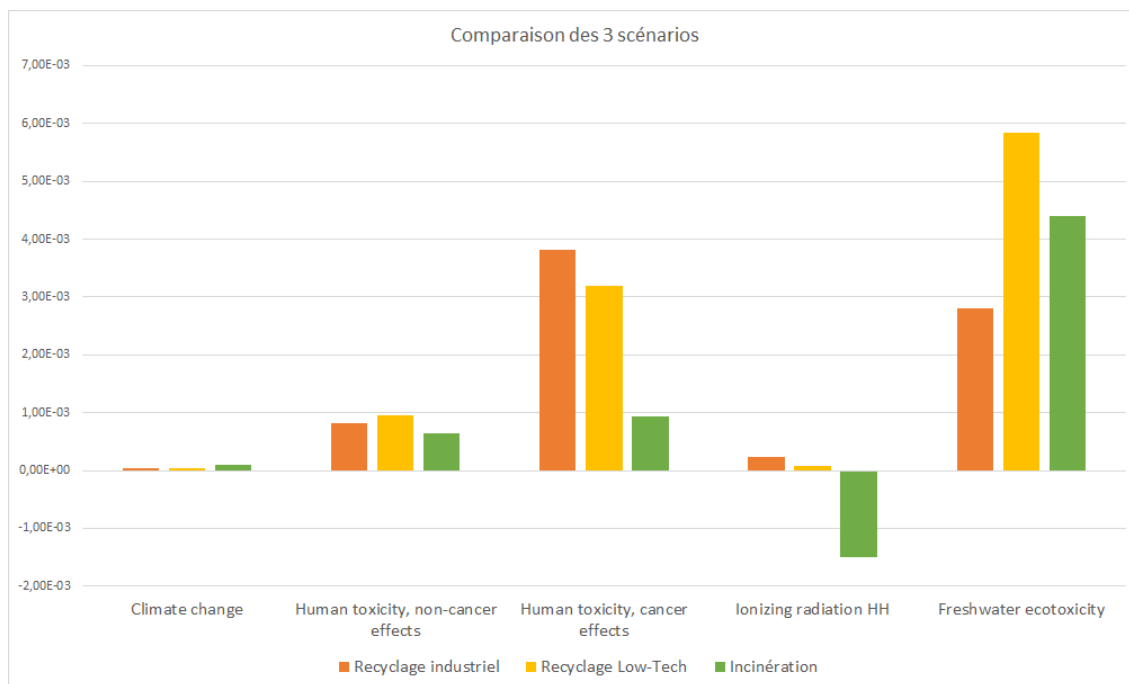


FIGURE 2.15 – Comparaison des 3 scénarios

Écotoxicité en eau douce

L'incinération des déchets plastiques a un impact normalisé important de 0,004736119. Cela pourrait être dû aux émissions de substances toxiques lors de l'incinération, qui peuvent finir par contaminer les sources d'eau douce et nuire à l'écosystème aquatique.

2.10 Interprétations

L'analyse de l'impact environnemental des différents scénarios peut effectivement aider à identifier les zones où des améliorations peuvent être faites pour réduire l'impact global. Dans le scénario du recyclage low tech, il semble que les étapes de la collecte et du four sont les plus impactantes, ce qui offre une opportunité pour des améliorations ciblées.

La modification de la méthode de collecte des bouchons pourrait avoir un im-

pact significatif. En remplaçant la voiture diesel par une voiture électrique pour la collecte des bouchons, les émissions de gaz à effet de serre pourraient être réduites. Cependant, il est important de noter que la production d'électricité nécessaire pour recharger la voiture électrique peut aussi avoir un impact environnemental. Néanmoins, si cette électricité provient de sources renouvelables, comme l'énergie solaire ou éolienne, cet impact pourrait être significativement réduit.

En ce qui concerne l'étape du four, l'idée de chauffer plusieurs plaques en même temps semble prometteuse. En faisant cela, l'efficacité énergétique du processus pourrait être améliorée, ce qui réduirait l'impact sur le changement climatique. De plus, cela pourrait également réduire le temps total nécessaire pour le processus et la consommation électrique.

C'est ici qu'une analyse de sensibilité peut s'avérer utile. Elle permet d'évaluer comment des changements dans les entrées et paramètres peuvent influencer les résultats de l'ACV.

Dans ce cas, certains paramètres ont été modifiés dans Simapro pour le scénario 2. Plus précisément, la voiture diesel utilisée pour la collecte des bouchons est remplacée par un vélo, et l'étape du four est modifiée pour chauffer plusieurs plaques en même temps. (Il aurait été intéressant de remplacer par une voiture électrique mais les données d'écoinvent 3 concernant les véhicules électriques sont trop peu complètes pour l'analyse). Le vélo effectuerait par contre 3 fois plus de trajet pour la même quantité de bouchon.

On estimait la consommation d'énergie du four à 0.75kW h. Pour produire une planche, le four était utilisé pendant environ 36,6 minutes. Si maintenant 4 planches sont mise en forme en même temps (20min de préchauffe+30min) : $50/4 = 12,5min$ par planche ce qui correspond à une consommation électrique de : $0.75 \times 0.208 = 0.156kWh$.

Les modifications apportées dans le cadre de l'analyse de sensibilité ont conduit



FIGURE 2.16 – Analyse de sensibilité

à des changements importants dans les impacts environnementaux de toutes les catégories d'impact pour le recyclage Low-Tech.

Changement climatique : L'impact est passé de 3,36E-05 à 1,44E-05. Cette réduction significative est attribuable à la substitution du véhicule diesel par un vélo pour la collecte des bouchons, réduisant ainsi les émissions de gaz à effet de serre.

Toxicité humaine, effets non-cancérogènes : L'impact dans cette catégorie a diminué de 0,000955616 à 0,000659977. Cette diminution pourrait être liée à une réduction de l'exposition aux substances toxiques, également grâce à la substitution du véhicule diesel par le vélo pour la collecte.

Toxicité humaine, effets cancérogènes : L'impact a été réduit de 0,003183812 à 0,002187394. Cette réduction peut être attribuée à une diminution des émissions potentiellement cancérogènes, encore une fois principalement en raison de la substitution du véhicule diesel par un vélo pour la collecte.

Rayonnement ionisant HH : L'impact dans cette catégorie a également diminué,

passant de $8,36E-05$ à $3,90E-05$. Cela suggère que l'amélioration de l'efficacité du processus four, résultant en une consommation d'électricité réduite, a contribué à réduire l'impact dans cette catégorie.

Écotoxicité en eau douce : L'impact dans cette catégorie est passé de $0,005848058$ à $0,003632096$. Cette réduction peut indiquer une diminution de l'impact sur les écosystèmes aquatiques, grâce à une consommation d'électricité réduite dans le processus du four et grâce à l'utilisation du vélo plutôt que de la voiture.

2.11 Conclusion

La valorisation des bouchons en HDPE via le recyclage Low-Tech, telle que pratiquée par Stéphanie, présente un intérêt certain en termes d'impacts environnementaux, en comparaison avec les scénarios industriels de recyclage ou d'incinération.

L'analyse du cycle de vie, en mettant en lumière les contributions spécifiques de chaque étape du processus, a souligné les opportunités d'optimisation. En particulier, les modifications apportées au mode de collecte des bouchons (en remplaçant un véhicule diesel par un vélo) et à l'étape du four (en améliorant l'efficacité du processus de chauffage), ont permis de réduire significativement les impacts environnementaux du recyclage low-tech. Ces résultats démontrent le potentiel d'amélioration du processus actuel et suggèrent que de nouvelles optimisations pourraient encore réduire les impacts environnementaux.

Il est également intéressant de noter que le scénario d'incinération, avec récupération d'énergie, n'est pas une mauvaise alternative du point de vue environnemental. En dépit des émissions générées par la combustion des bouchons en HDPE, la production d'énergie évite l'utilisation de sources d'énergie plus polluantes, compensant ainsi une partie de l'impact. Cependant, cette approche nécessite une infrastructure d'incinération adéquate et ne contribue pas à la préservation des ressources matérielles comme le fait le recyclage.

Il est important de préciser que cette analyse présente certaines limites et que d'autres facteurs doivent être pris en compte pour une évaluation complète de l'impact environnemental. Notamment, cette étude ne prend pas en compte la production et la fin de vie des outils et équipements utilisés par Stéphanie dans son processus de revalorisation. Ces phases pourraient avoir un impact significatif sur l'évaluation globale de l'impact environnemental.

Enfin, un aspect essentiel de la revalorisation mis en œuvre par Stéphanie est qu'elle aboutit à un produit fini, prêt à l'emploi. Non seulement ce produit est fonctionnel, mais il possède également une dimension esthétique qui contribue à sa valeur ajoutée. Cela contraste avec les deux autres scénarios qui, bien que produisant des granulés prêts à l'emploi ou de l'énergie, nécessitent des étapes de transformation ultérieures pour aboutir à des applications concrètes.

En conclusion, cette étude démontre que le recyclage Low-Tech des bouchons en HDPE, malgré ses défis, peut être une alternative viable aux approches industrielles, à condition que des efforts soient faits pour optimiser les processus clés et que des précautions soient prises point de vue santé. Elle souligne également l'importance de considérer une variété de solutions pour la gestion des déchets, en tenant compte des spécificités contextuelles et des impacts environnementaux associés à chaque option.

Chapitre 3

Caractérisation du matériau

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, l'objectif était de caractériser les propriétés des échantillons de polypropylène (PP) et de polyéthylène (PE) recyclés pour évaluer leur utilisation potentielle dans des applications spécifiques, comme par exemple des planches à découper. Pour atteindre cet objectif, nous avons conçu et effectué une série de tests, notamment des essais de tomographie, de tribologie, et des tests de microdureté.

En premier lieu, des essais de tomographie ont été menés pour examiner l'homogénéité des échantillons et détecter les défauts de premier ordre. Cette analyse est cruciale pour se faire une idée de la structure interne des échantillons, qui peut avoir un impact significatif sur leurs propriétés mécaniques.

3.2 Matériaux et méthodes

Une variété de tests ont été effectués pour caractériser les propriétés des échantillons de polypropylène et de polyéthylène recyclés. Ces propriétés ont été étudiées et analysées via des tests de tribologie, de micro-dureté et de tomographie.

3.2.1 Échantillons

La mise en forme des échantillons a été réalisée à l'aide de deux types de feuilles de téflon, qui ont généré des topographies distinctes sur les surfaces des planches. Ces topographies ont été annotées comme 'B' (Big) pour des reliefs et motifs volumineux.

Dans un premier temps, les échantillons au format A4 ont été découpé grossièrement en carré de 8cm de coté pour pouvoir être fixé au tribomètre via ce système de fixation suivant.



FIGURE 3.1 – Système permettant la fixation à la table de test du tribomètre.

Huit échantillons ont été analysés au total, deux pour le PP mise en forme à 250°C, 2 pour le PP à 225°C, 2 pour le PE à 250°C et 2 pour le PE à 225°C. Deux échantillons pour chaque combinaison de type de plastique (PP ou PE) et de température de mise en forme (250°C ou 225°C) pour étudier si les deux "topographies" différentes ont une influence sur l'usure. La nomenclature des échantillons est la suivante : PP250B désigne un échantillon de PP formé à 250°C avec la topographie 'B'. L'absence de la lettre B dans la nomenclature fait référence à la topographie classique.

3.2.2 Tomographie

Ici seulement quatre échantillons ont été analysés par tomographie. Cette technique d'imagerie a permis d'examiner en détail l'agencement et l'architecture interne des échantillons. Les échantillons sélectionnés pour ce processus étaient représentatifs des différentes conditions de fabrication utilisées : deux échantillons de polypropylène et deux échantillons de polyéthylène, chacun à des températures de formation de 225°C et 250°C.

Pour chaque échantillon, une coupe transversale à mi-hauteur a été analysée. Cela a permis une évaluation précise de la structure interne à un niveau représentatif de l'échantillon entier.

Pour une représentation plus visuelle, une reconstruction 3D a été réalisée sur deux échantillons spécifiques : le PP formé à 225°C et le PE formé à 225°C. Cette reconstruction 3D a permis de visualiser de manière détaillée l'organisation spatiale des échantillons et d'identifier toute hétérogénéité ou défauts de structure potentiels. L'analyse des images reconstruites a ensuite servi à compléter et à renforcer nos résultats obtenus à partir des essais de tribologie, des analyses de volume de saillie et des tests de micro-dureté.

3.2.3 Essais avec le tribomètre

Un protocole a été mis en place dans lequel le contact standard bille/matériau a été remplacé par un pion de géométrie spécifique, pour simuler le contact d'un couteau avec une planche à tartiner.

Pour chaque échantillon, cinq forces distinctes (5N, 20N, 40N, 80N, et 120N) ont été appliquées le long de cinq pistes linéaires de 1 cm de long. Le pion se déplaçait le long de la piste à une vitesse de $\frac{1}{3}mm/s$. Ensuite, pour tenter de quantifier le risque de détachement de matière, les différents sillons creusés par le pion ont été analysés à l'aide du microscope 3D.

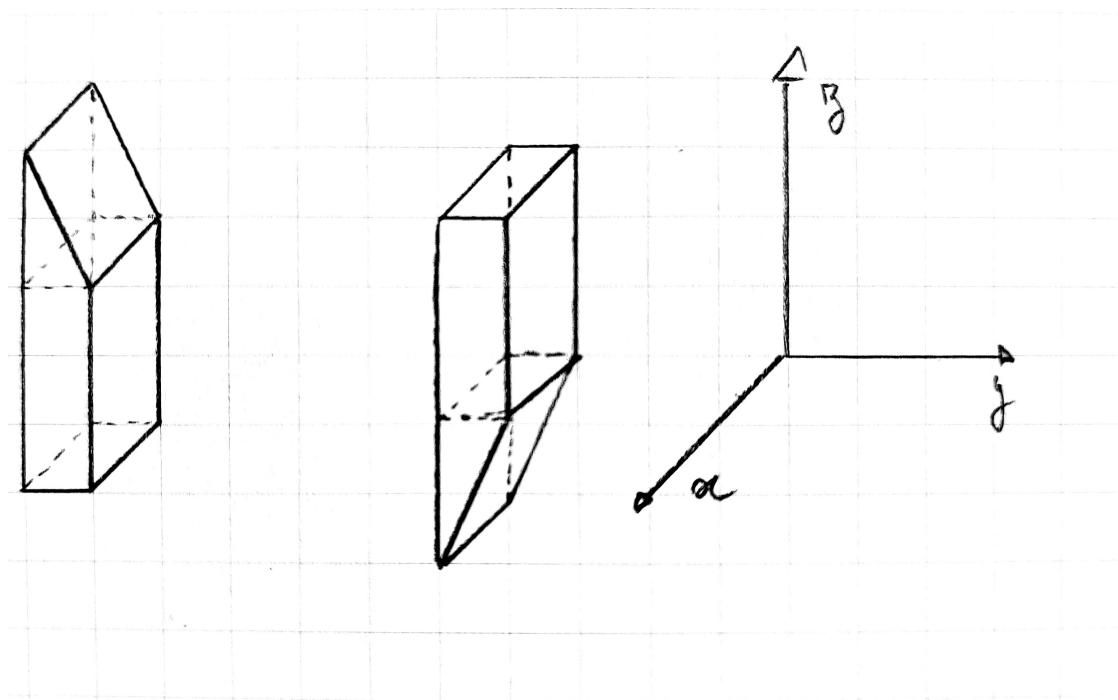


FIGURE 3.2 – Esquisse de la géométrie du pion

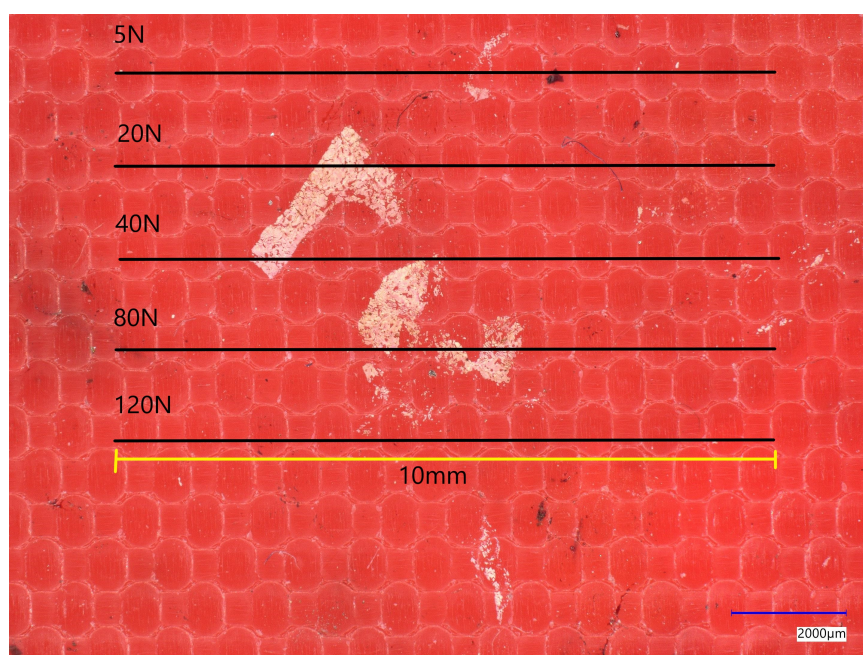


FIGURE 3.3 – Méthodologie

Afin de quantifier le risque de détachement de matière par l'estimation du volume de saillie résultant de l'écoulement plastique, une méthode spécifique a été mise en place. C'est cette terminologie qui sera utilisé dans cette partie pour décrire un volume qui dépasse d'une surface plane.

Des courbes de profils en 2D ont été obtenues à partir des images du microscope 3D pour analyser les volumes de saillie. Sur chaque piste, 12 sections transversales équidistantes ont été sélectionnées pour calculer l'aire de saillie.



FIGURE 3.4 – 12 sections transversales équidistantes

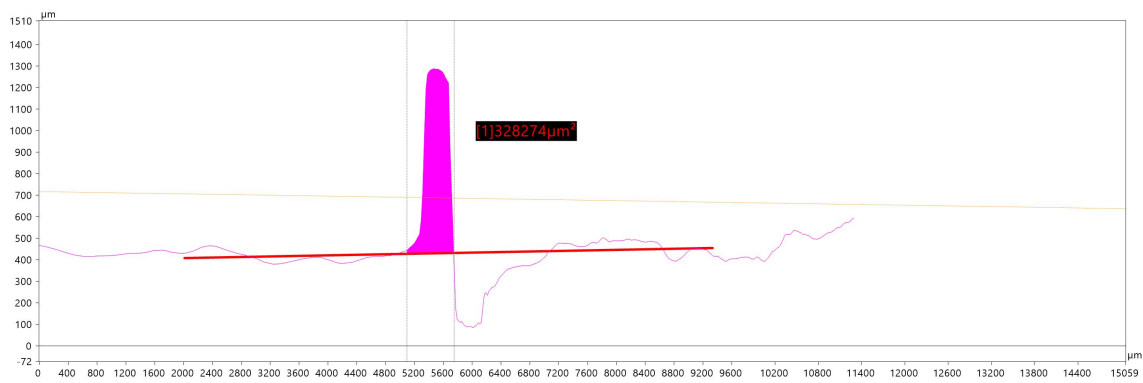


FIGURE 3.5 – Calcul des aires de saillie

C'est l'aire de ces zones qui est ensuite utilisée pour estimer le volume de saillie. Par la suite, ces valeurs ont été enregistrées dans un fichier Excel, chaque colonne représentant un échantillon soumis à une des forces. À l'aide de Python, les données stockées dans le fichier Excel ont ensuite été analysées comme ceci.

	A	B	C	D	E	F	G
1		PE225B_40	PE250B_40	PE225_40	PE225_80	PE225B_80	PE250B_80
2	Aire 1	72476	87225	63341	246578	182443	177037
3	Aire 2	252833	150190	57067	492048	458658	275005
4	Aire 3	284452	172986	76384	328274	392269	234639
5	Aire 4	203332	170578	86752	391735	338997	259300
6	Aire 5	182110	161754	119643	397392	309276	300510
7	Aire 6	167565	154725	153693	298853	254897	235476
8	Aire 7	175499	118956	177180	290984	282511	271102
9	Aire 8	102919	69069	157593	286295	384117	418966
10	Aire 9	74922	59720	163378	493026	276890	211588
11	Aire 10	50101	52020	182239	6867	213461	205015
12	Aire 11	28456	38120	238502	14873	255854	255763
13	Aire 12	12507	11007	303776	9698	91338	53138

FIGURE 3.6 – Stockage des différentes aires calculées via le microscope 3D

Lecture des valeurs de y à partir du fichier CSV : Les valeurs de y représentent les 12 mesures d'aires préalablement obtenues au microscope 3D. Ces mesures correspondent aux différentes sections transversales de chaque sillon, prises de manière équidistante sur une distance de 10 mm.

Interpolation des mesures d'aires : Le programme utilise la méthode des splines cubiques pour interpoler les mesures d'aires. Cela permet de créer une courbe fluide qui représente l'estimation des aires entre les points de mesure. L'interpolation permet ainsi de lisser les données et de fournir une estimation continue de l'aire le long de la piste. L'interpolation des aires calculées pour l'échantillon de PP225 soumis à une force de 80N est représenté à la figure suivante.

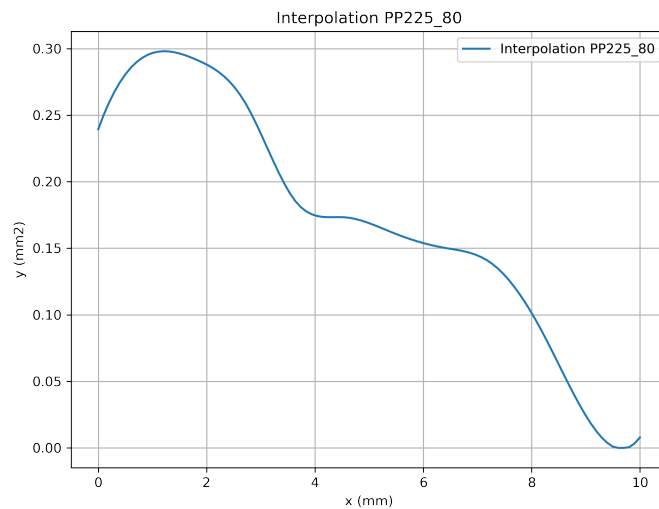


FIGURE 3.7 – Interpolation pour le PP225_80

Calcul de l'aire totale et donc du volume de saillie : Une fois que les valeurs interpolées sont obtenues, le programme utilise une méthode d'intégration numérique (méthode de Simpson) pour calculer l'aire totale sous la courbe d'interpolation. En intégrant le long de la piste entre 0 et 10 mm, on obtient une estimation du volume de saillie.

3.2.4 Tests de micro-dureté

Ensuite, sur les mêmes échantillons, des tests de micro dureté ont été réalisés. L'objectif de ces tests était d'essayer de mettre en évidence une relation entre la dureté des échantillons et leur comportement lors des tests réalisés avec le tribomètre précédemment.

La micro-dureté est une mesure de la résistance d'un matériau à la pénétration, utilisée généralement pour des échantillons de petite taille ou pour des couches de surface très minces. Cette mesure est particulièrement utile pour caractériser des matériaux hétérogènes ou des matériaux dont la microstructure varie à une échelle très fine.

Le test de micro-dureté ici utilisée, HV 0,2, se réfère à la dureté Vickers pour

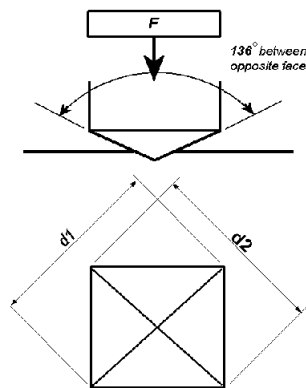


FIGURE 3.8 – Géométrie d'un indenteur de Vickers[30]

une charge de 0,2 kgf (kilogramme-force). Ce test est effectué en appliquant une charge sur une pointe de diamant de forme pyramidale carrée contre la surface de l'échantillon. La charge est maintenue pendant une durée déterminée, ici 10 secondes, avant d'être retirée. La taille de l'empreinte laissée par la pointe sur la surface de

l'échantillon est ensuite mesurée à l'aide d'un microscope, et la dureté Vickers est calculée à partir de cette formule :

$$HV = \frac{2F \sin\left(\frac{136^\circ}{2}\right)}{g * d^2} \cong 1854.4 * \frac{F}{d^2} \quad (3.1)$$

Où g est la pesanteur $g = 9.81N/kg$, d est la moyenne des diagonales de l'indentation en micromètres $d = \frac{d_1+d_2}{2}$ et F la force appliquée par l'indent.

Ici la micro-dureté HV 0,2 indique donc que la charge appliquée est de 0,2 kgf, soit environ 1,96 Newtons.

Sur chacun des 8 échantillons, 20 indents ont été réalisés. 8 sur les parties supérieures du relief, et 12 sur les parties inférieures.

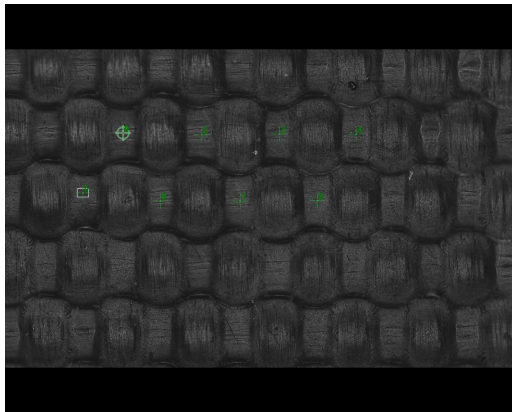


FIGURE 3.9 – Partie supérieure de la topographie

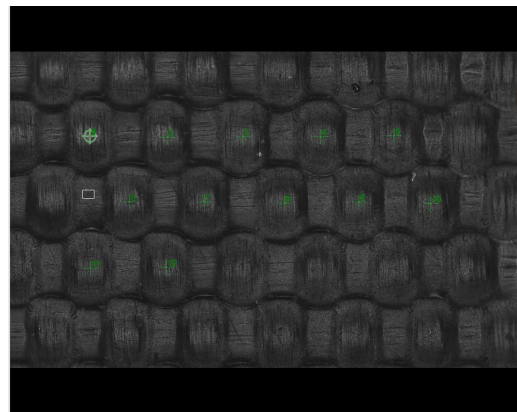


FIGURE 3.10 – Partie inférieure de la topographie

La dureté des plastiques est généralement mesurée à l'aide de l'échelle de dureté Shore ou une pointe en acier de forme conique vient exercer une pression sur la surface du matériau. La pointe pénètre dans le matériau et la profondeur d'indentation est mesurée. Pour le cas du PP et PE, la dureté Vickers n'est peut être pas l'option la plus idéale pour mesurer leur dureté mais elle permet quand même de donner une idée générale de la dureté relative des différents échantillons.

Il est important de noter que la mesure de la micro-dureté peut être influencée par plusieurs facteurs, y compris la préparation de l'échantillon, l'exactitude de la

mesure de l’empreinte, et la présence de toute imperfection superficielle. Par conséquent, il est important ici de réunir les 20 mesures sur chaque échantillon et de prendre la moyenne pour obtenir une mesure plus fiable.

3.3 Résultats et analyse

3.3.1 Tomographie

En analysant les résultats de la tomographie, nous observons une différence notable entre les échantillons de PP et de PE. Pour les échantillons de PE, des défauts sous forme de vides internes sont visibles, principalement situés à mi-hauteur de l’échantillon. Ces vides, qui ressemblent à des ”bulles”, peuvent indiquer un phénomène de dégazage interne lors de la mise en forme du matériau. Le dégazage peut se produire lorsque des gaz piégés à l’intérieur du matériau s’échappent à mesure que le matériau est chauffé et mis en forme. Ce phénomène peut être influencé par des variations de température ou de pression pendant le processus de mise en forme. [41]

En ce qui concerne les échantillons de PP, des vides interstitiels entre les flocons

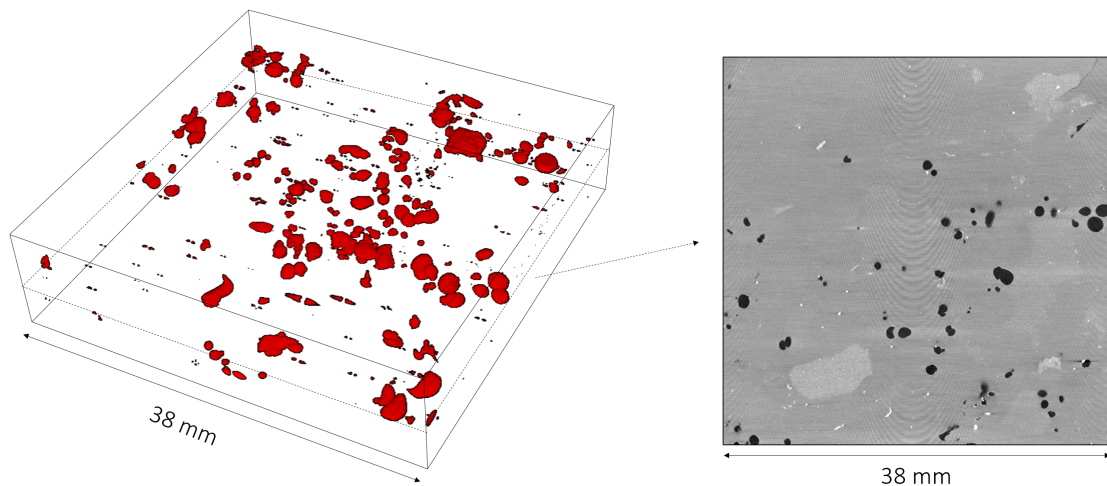


FIGURE 3.11 – Reconstruction 3D et coupe transversale à mi-hauteur du PE225

ou granulés de PP sont visibles. Ces vides, ressemblants à des filaments, peuvent être le résultat d’un mauvais compactage des granulés lors de la mise en forme de l’échantillon. Il est possible que ces granulés n’aient pas complètement fusionné lors du processus de mise en forme, laissant des vides interstitiels. [41]

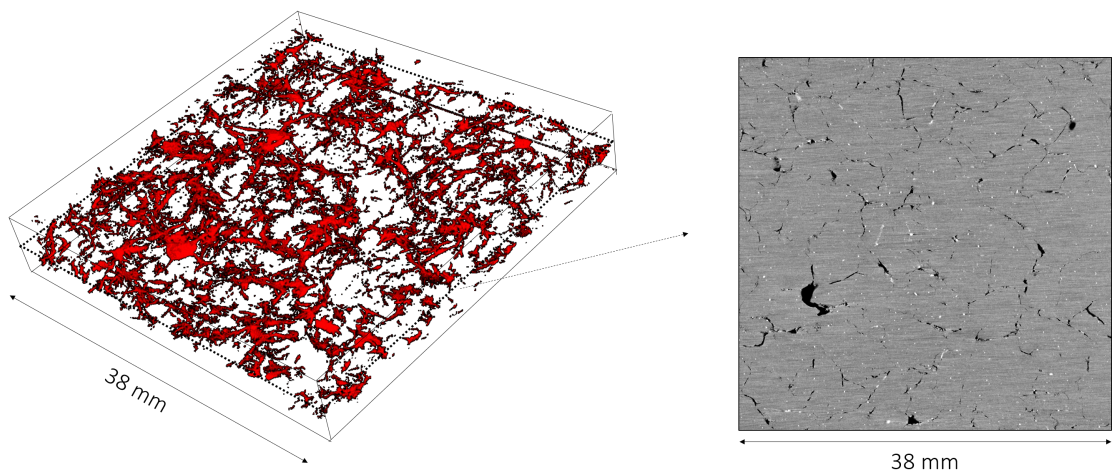


FIGURE 3.12 – Reconstruction 3D et coupe transversale à mi-hauteur du PE250

Dans les deux types de matériaux, une hétérogénéité plus marquée est observée à mesure que l'on se rapproche du centre de l'échantillon, tandis que les zones périphériques semblent plus homogènes. Cela peut être dû à une répartition inégale de la chaleur pendant le processus de mise en forme, ce qui pourrait avoir affecté la fusion et le compactage du matériau de manière différente en fonction de la position dans l'échantillon.

Il est également intéressant de noter que dans les deux cas, les échantillons for-

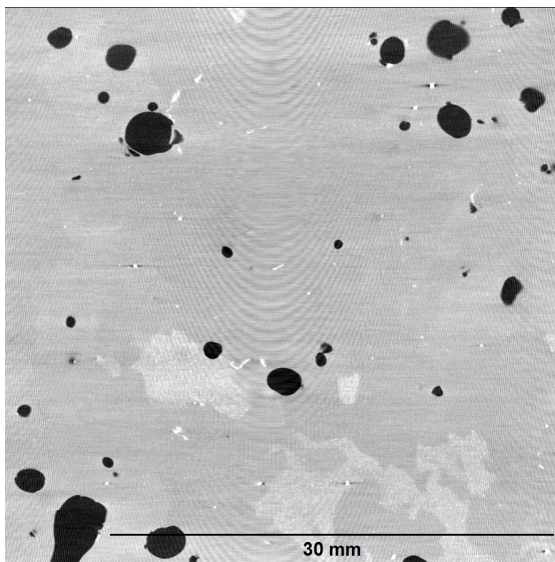


FIGURE 3.13 – Coupe transversale à mi-hauteur du PE250

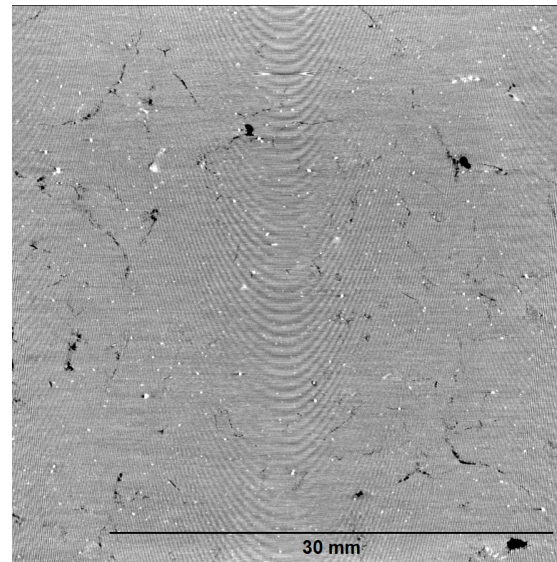


FIGURE 3.14 – Coupe transversale à mi-hauteur du PP250

més à 250°C semblent être plus homogènes que ceux formés à 225°C. Cela pourrait

s'expliquer par l'influence de la température de la mise en forme sur le Melt Flow Index (MFI) du matériau. Le MFI est une mesure de la viscosité du polymère à l'état fondu. À mesure que la température augmente, le MFI du polymère augmente également, indiquant que le matériau est plus facile à travailler et à mouler. Cela peut contribuer à la formation d'un produit plus homogène, car le polymère fondu peut remplir plus efficacement le moule et se conformer plus précisément à sa forme. De plus, une température plus élevée peut aider à minimiser la formation de vides et de défauts internes. À des températures plus basses, le polymère peut ne pas être assez fluide pour éliminer complètement les vides d'air lors du moulage, conduisant à la formation de défauts une fois le plastique refroidi et durci. [41]

Ces observations sont importantes car elles peuvent avoir un impact sur les propriétés mécaniques des matériaux, telles que leur résistance à la déformation. Elles peuvent également avoir des implications pour l'optimisation du processus de mise en forme, en indiquant les conditions qui favorisent la formation d'un matériau plus homogène et la minimisation des défauts internes.

3.3.2 Volume de saillie

Le tableau ci dessous reprends les différents volumes de saillie. Le nombre en rouge dans la nomenclature PE225_XX représente l'intensité de la force appliquée lors de l'essai.

Résultats			
PE	Volume	PP	Volume
PE225B_40	1.4423	PP225B_40	0.6782
PE225B_80	3.0786	PP225B_80	1.8198
PE225_40	1.4439	PP225_40	0.7137
PE225_80	2.9302	PP225_80	1.7169
PE250B_40	1.0978	PP250B_40	0.5739
PE250B_80	2.5808	PP250B_80	1.2654
PE250_40	1.1363	PP250_40	0.6050
PE250_80	1.9153	PP250_80	0.9099

Dans le cadre de cette étude, il a été nécessaire d'ajuster la gamme de forces appliquées sur les échantillons pour obtenir des résultats significatifs et mesurables.

En effet, certaines valeurs de forces ont dû être éliminées pour diverses raisons.

D'une part, les forces de 5N et 20N ont produit des déformations très faibles sur les échantillons. Ces déformations étaient si minimes que les différences entre les échantillons étaient difficilement discernables et donc peu significatives. De plus, les imprécisions inhérentes aux estimations et interpolations nécessaires pour le calcul des volumes de déformation rendaient les résultats peu fiables pour ces forces plus faibles.

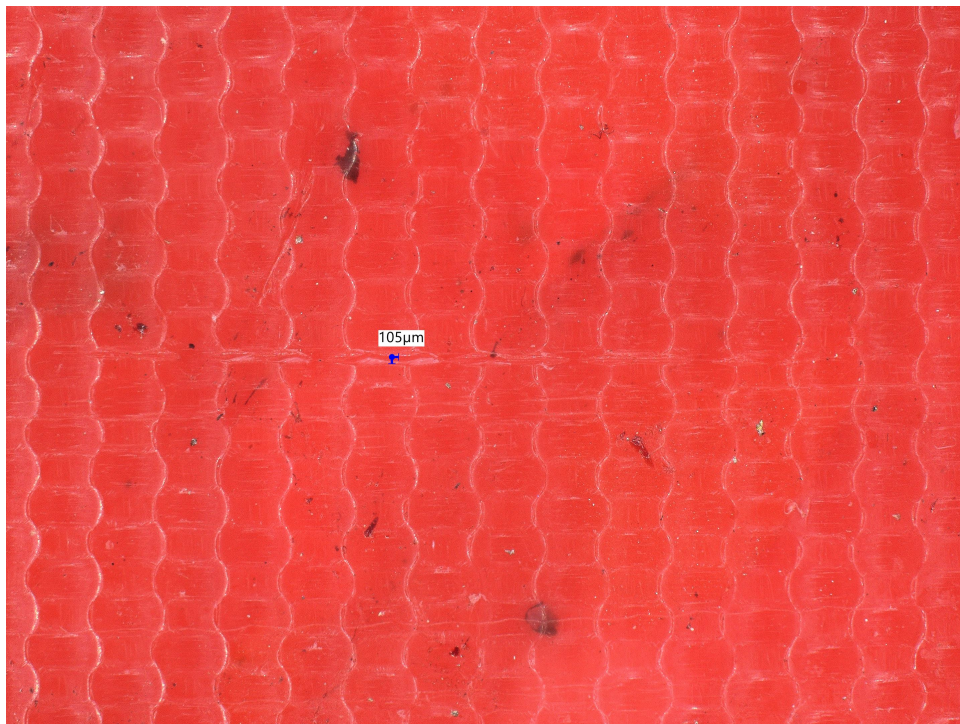


FIGURE 3.15 – PE225 soumis à une force de 5N magnifié 20 fois

D'autre part, l'application d'une force de 120N a entraîné des déformations importantes sur les échantillons.

Cependant, il est important de noter que l'application d'une force de 120 N sur certains échantillons a présenté des difficultés spécifiques. En particulier, une fois le mouvement de la pointe métallique terminé, celle-ci se soulève de quelques millimètres afin de revenir à sa position initiale.

En raison du sillon profond creusé dans l'échantillon sous l'effet de la force ap-

pliquée, les forces de frottement entre le pion et l'échantillon étaient suffisamment élevées pour provoquer un phénomène d'adhésion. Ainsi, au lieu de se dégager simplement de l'échantillon, la pointe a entraîné celui-ci avec elle tout au long de son trajet pour regagner sa position initiale.

Ce phénomène a eu pour conséquence de modifier le motif de déformation attendu sur l'échantillon, rendant ainsi l'interprétation et la quantification des résultats plus complexes. Pour cette raison, les données obtenues avec une force de 120 N ont été exclues de l'analyse finale.

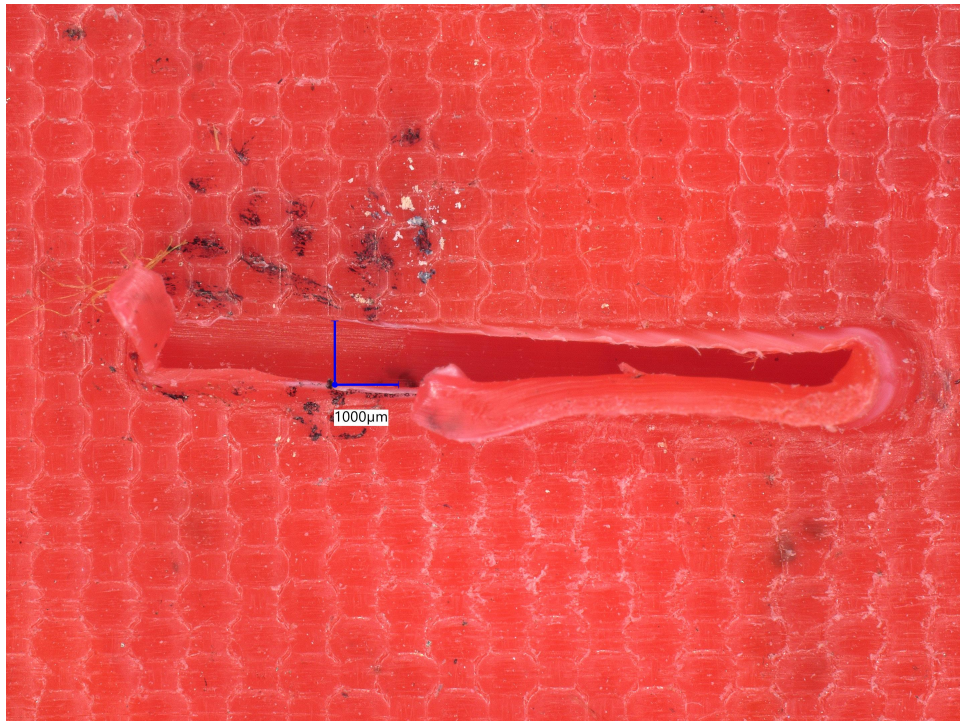


FIGURE 3.16 – PE225 soumis à une force de 120N magnifié 20 fois

Ainsi, pour garantir la fiabilité et la précision des résultats, seules les données obtenues avec des forces de 40N et 80N ont été conservées pour l'analyse. Ces forces ont permis de générer des déformations mesurables et significatives sur les échantillons, tout en évitant les problèmes de complexité et d'imprécision rencontrés avec les forces plus faibles ou plus élevées.

Influence du matériau

L'analyse des résultats indique que, pour des forces de 40N et 80N, le volume de saillie est généralement plus important pour le PE que pour le PP, indépendamment des conditions de température et de recyclage. Ce comportement peut être attribué aux différences intrinsèques entre les deux polymères en termes de structure moléculaire et de propriétés mécaniques.

Influence de la température de mise en forme

Pour une même matière (PE ou PP) et une même force (40N ou 80N), une tendance générale se dégage : le volume de saillie augmente lorsque la température de mise en forme passe de 225°C à 250°C. Cette augmentation pourrait être due à une augmentation de la cristallinité du matériau.

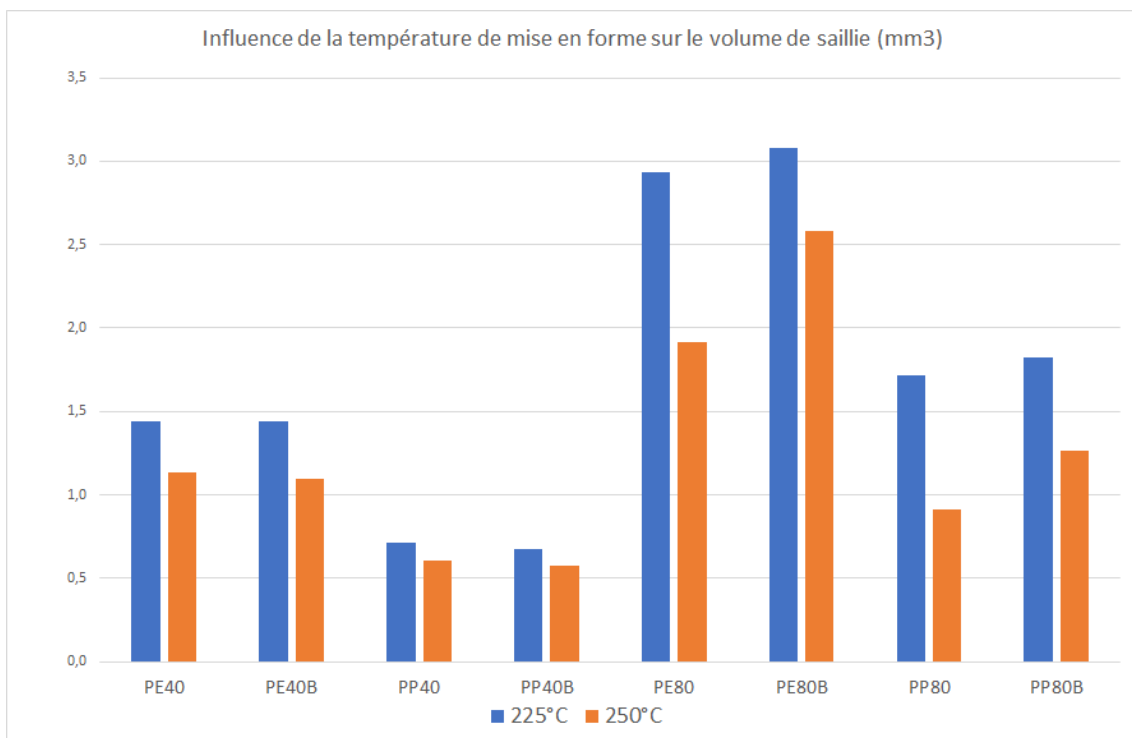


FIGURE 3.17 – Influence de la température sur les volumes de saillie

Cristallinité

L'un des aspects clés à considérer dans l'analyse des résultats est le rôle de la cristallinité dans le comportement de ces polymères.

Le HDPE et le PP sont tous deux des polymères semi-cristallins, ce qui signifie qu'ils présentent à la fois des régions cristallines ordonnées et des régions amorphes désordonnées. La cristallinité d'un polymère semi-cristallin est définie comme le pourcentage de matériau qui présente une structure cristalline. $X_c = \frac{M_c}{M} = \frac{V_c}{V}$ Où M_c et V_c sont respectivement la masse et le volume de la phase cristalline. M et V , respectivement sont, la masse et le volume de l'échantillon. Cette cristallinité joue un rôle crucial dans la détermination des propriétés physiques et mécaniques des polymères, y compris leur résistance à la déformation et leur dureté. Les zones plus cristallines d'un polymère sont généralement plus résistantes et moins susceptibles de se déformer que les zones amorphes.

L'une des caractéristiques des matériaux semi-cristallins est la présence de sphérolites, qui sont des structures sphériques de polymères cristallisés qui se développent à partir d'un point central lors du refroidissement d'un polymère fondu. Ces sphérolites contiennent des régions cristallines compactes séparées par des régions amorphes, et leur taille peut varier en fonction des conditions de refroidissement. Les sphérolites de grande taille sont souvent associées à une cristallinité plus élevée, car un refroidissement plus lent permet une organisation plus complète des chaînes polymères.

Concernant l'effet de la température de mise en forme, lorsqu'un polymère est chauffé au-delà de sa température de fusion, il passe à un état amorphe, ses régions cristallines se dissolvent. Toutefois, lors du refroidissement après la mise en forme, le polymère a la possibilité de recristalliser. Ce processus de recristallisation dépend fortement de la vitesse de refroidissement. Un refroidissement lent permet une organisation plus efficace des chaînes polymères, augmentant ainsi la cristallinité, tandis qu'un refroidissement rapide conduit à une structure plus amorphe.

PP

”L’étude ”Effects of recycling on the microstructure and the mechanical properties of isotactic polypropylene”[5] fait état d’une augmentation de l’indice de fluidité à l’état fondu (MFI) lors du recyclage du PP. Le MFI est en corrélation directe avec la longueur des chaînes moléculaires du polymère, de sorte que des chaînes plus courtes entraînent une augmentation du MFI. De plus, ces chaînes plus courtes peuvent se plier et s’aligner plus facilement, favorisant ainsi la cristallinité.

Dans cette étude, deux températures de mise en forme distinctes ont été utilisées, 225°C et 250°C. En théorie, une température de mise en forme plus élevée peut provoquer une dégradation thermique plus importante du PP, où les liaisons dans les chaînes polymères sont brisées en raison de la chaleur excessive. Cette dégradation peut résulter en des chaînes plus courtes, d’où une augmentation du MFI. De plus, ces chaînes plus courtes ont une capacité accrue de s’aligner et de se plier, ce qui pourrait favoriser la cristallinité.[5][31]

Il est important de noter qu’une augmentation de la cristallinité pourrait entraîner une diminution du volume de saillie. La raison en est que les polymères cristallins sont généralement plus durs et plus rigides que les polymères amorphes, ce qui pourrait entraîner une résistance accrue à la déformation plastique. Par conséquent, lorsque la température de mise en forme est augmentée à 250°C, l’augmentation de la cristallinité résultante pourrait expliquer la diminution observée du volume de saillie.

Il convient toutefois de mentionner que l’effet de l’augmentation de la température de mise en forme sur la cristallinité est un sujet complexe. Bien que la théorie évoquée ci-dessus soit plausible, d’autres facteurs pourraient également être en jeu. Par exemple, une température de mise en forme plus élevée pourrait entraîner une cristallinité réduite dans certaines circonstances. Il est donc nécessaire de procéder à une analyse plus approfondie pour confirmer les observations et les hypothèses actuelles.”

Une mesure plus précise de la cristallinité pourrait être réalisée à l'aide de techniques expérimentales comme la calorimétrie différentielle à balayage ou la cristallographie aux rayons X. Ces techniques peuvent fournir des informations plus précises sur le degré de cristallinité des échantillons et aider à interpréter plus précisément les résultats obtenus.

Le recyclage entraînerait une légère augmentation du module d'élasticité et de la résistance en traction, il serait également intéressant d'étudier ces paramètres sur les échantillons low tech afin de les comparer avec les données d'Aurrekoetxea et al. (2001).

PE

Pour le PE, il est important de prendre en compte deux effets concurrents entraînés par la dégradation thermique : **La réticulation** et la scission des chaînes.

Pour les polymères semi-cristallins tels que le PE, la réticulation peut favoriser la formation de liaisons supplémentaires entre les chaînes polymères cristallines. Cela renforce la structure cristalline du plastique et peut entraîner une augmentation de sa cristallinité.

La cristallinité est souvent associée à des propriétés mécaniques améliorées, telles qu'une résistance à la traction supérieure, une rigidité accrue et une meilleure résistance aux contraintes. Ainsi, la réticulation peut contribuer à améliorer les performances mécaniques du PE recyclé en augmentant sa cristallinité.

Dans le cadre de cette étude, si une diminution du volume de saillie est observée avec l'augmentation de la température de mise en forme pour le PE, cela pourrait être également attribué à l'augmentation de la cristallinité accrue. Cette cristallinité accrue rend le matériau plus résistant et plus rigide, ce qui pourrait diminuer le volume de saillie. Cependant, il est important de souligner qu'une analyse plus approfondie serait nécessaire pour confirmer cette hypothèse.

Topographie

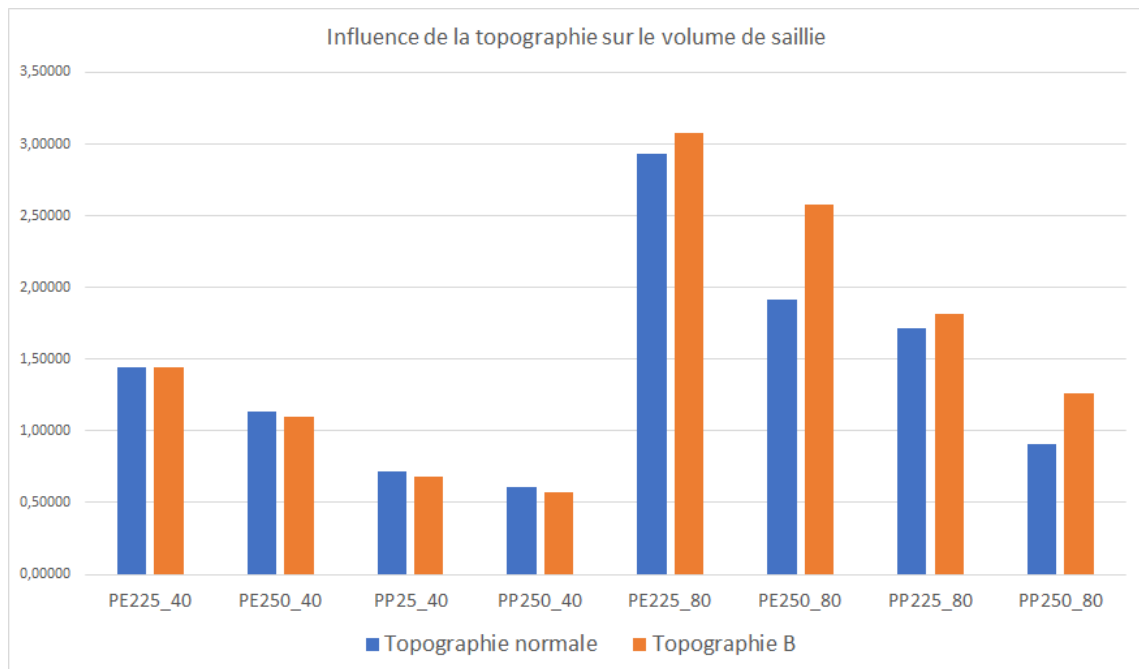


FIGURE 3.18 – Influence de la topographie sur le volume de saillie

Pour une même force appliquée donnée, les échantillons avec la topographie B ont tendance à présenter un volume de saillie légèrement plus élevée que leurs homologues. En effet les motifs plus rapprochés peuvent agir comme une sorte de "renforcement" microscopique, dispersant mieux les contraintes appliquées sur la surface de l'échantillon et résistant ainsi à la déformation.

Enfin, comme on pouvait s'y attendre, une force appliquée plus élevée entraîne une déformation plus importante pour tous les échantillons.

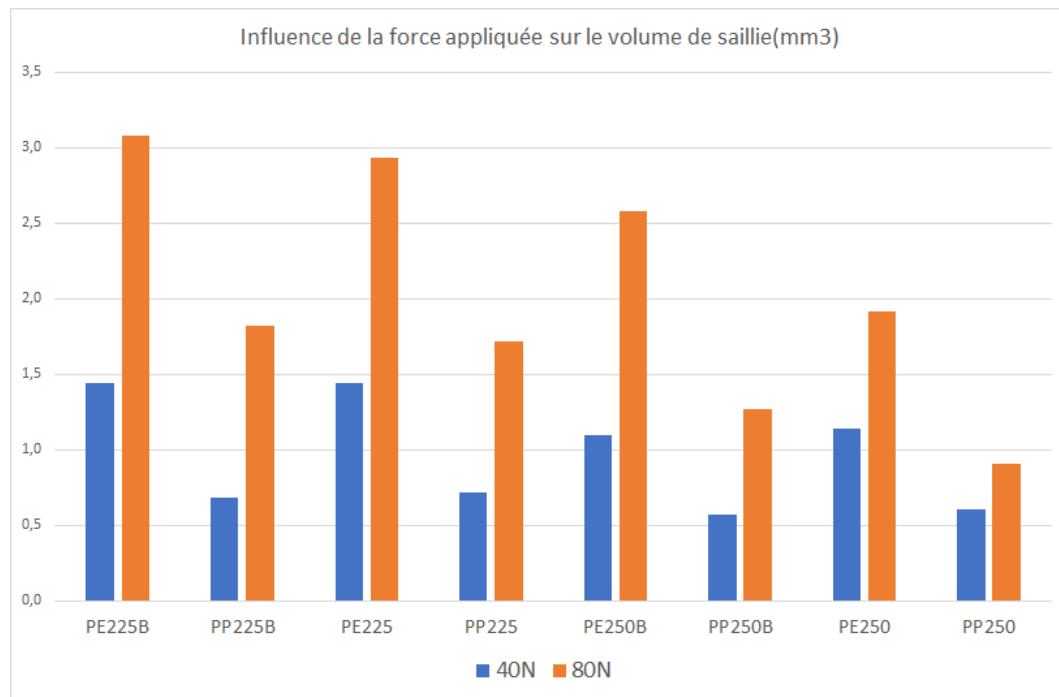


FIGURE 3.19 – Influence de la force sur le volume de saillie

Allure du sillon

Lors de l'examen post mortem des échantillons de polypropylène et de polyéthylène, il est possible d'observer des schémas de sillons distincts. Plus spécifiquement, pour le PE, l'excès de matière, semble se concentrer davantage vers la fin du mouvement. En revanche, pour le PP, la déformation semble être plus uniforme tout au long du mouvement.

Tout ces résultats sont cohérents avec la connaissance générale que le PE a une

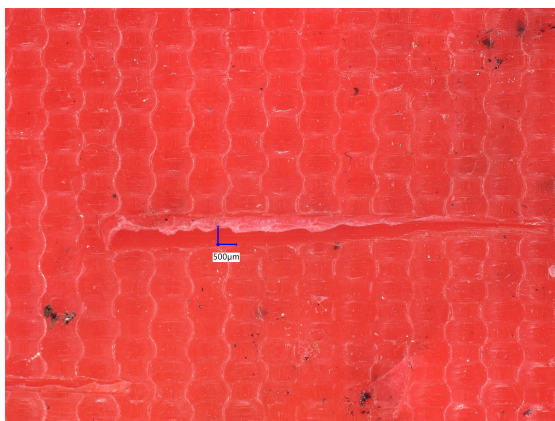


FIGURE 3.20 – PE225B_40N



FIGURE 3.21 – PP225B_40N

résistance à la traction inférieure et une plus grande ductilité par rapport au PP, ce qui le rend plus susceptible à la déformation sous l'effet d'une force appliquée.

En revanche, le PP, ayant une résistance à la traction supérieure et une moindre ductilité, est plus résistant à la déformation.

3.3.3 Micro-dureté

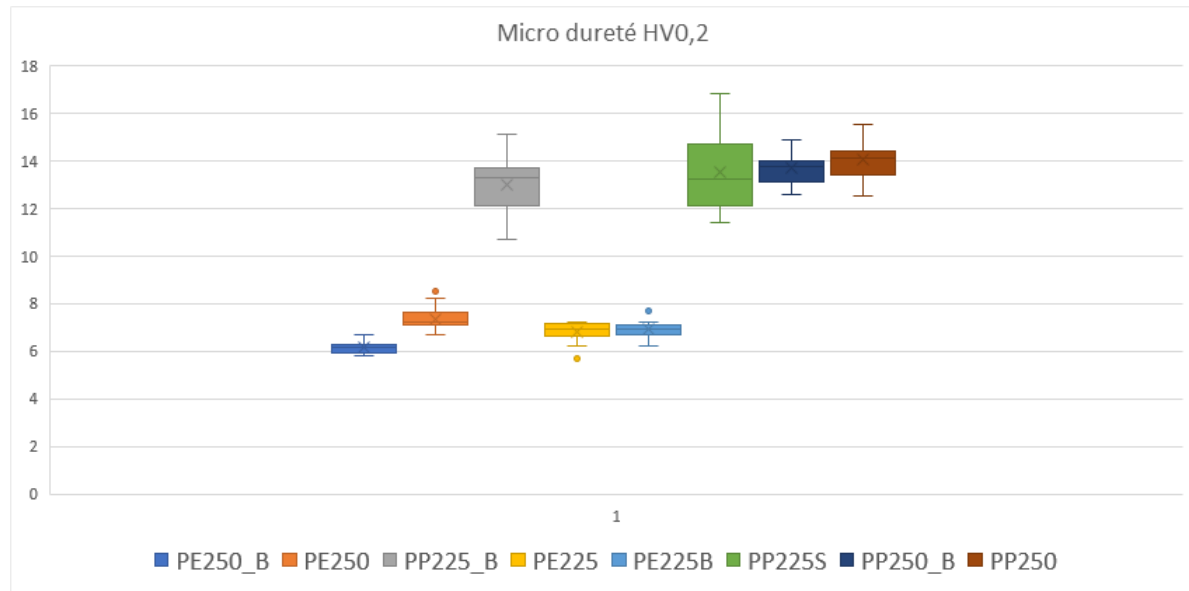


FIGURE 3.22 – Résultat des tests de micro durezza HV 0,2

D'après les résultats, nous pouvons observer que les échantillons de PP présentent une dureté significativement plus élevée que ceux de PE, indépendamment de leur traitement thermique ou de la surface du moule utilisée pour leur formation.

En particulier, les échantillons de PP présentent une dureté d'environ 13.5 HV0.2, tandis que ceux de PE ont une dureté d'environ 6 à 7 HV0.2. Cela est cohérent avec le fait que le PP est généralement un matériau plus dur que le PE.

En ce qui concerne l'effet de la température de mise en forme et de la surface du moule, on observe une tendance à une légère augmentation de la dureté avec l'augmentation de la température de traitement pour les échantillons de PE, tandis que pour ceux de PP, la dureté semble légèrement diminuer. Cependant, ces différences sont relativement faibles et peuvent ne pas être significatives.

Les micro dureté mesurées sur les parties supérieures et inférieures n'ont également pas montrée de différences significatives.

3.3.4 Micro-dureté et volume de saillie

	PE225	PE225B	PE250	PE250B	PP225	PP225B	PP250	PP250B
Dureté HV=0.2	6.8	6.905	7.365	6.135	13.505	13.005	14.03	13.675
Volume 40N	1.44390	1.44230	1.13630	1.09780	0.71370	0.67820	0.60500	0.57390
Volume 80N	2.93020	3.07860	1.91530	2.58080	1.71690	1.81980	0.90990	1.26540

TABLE 3.1 – Moyenne des duretés et volumes de déformation pour les échantillons de PE et PP.

En ce qui concerne les volumes de saillie mesurés précédemment, on peut s'attendre à une corrélation inverse entre la dureté et le volume de saillie : les matériaux plus durs devraient se déformer moins que les matériaux moins durs sous l'effet d'une force appliquée. Cela semble être confirmé pour chaque force, car les échantillons de PP, qui sont plus durs, ont tendance à avoir des volumes de saillie plus faibles que ceux de PE.

Toutefois, il convient de noter que la dureté n'est qu'un des nombreux facteurs qui peuvent influencer le comportement à la déformation d'un matériau. D'autres facteurs, tels que la microstructure du matériau, sa ténacité, ou encore l'interaction entre le matériau et l'outil de coupe, peuvent également jouer un rôle important.

En conclusion, bien que ces tests de microdureté confirment que le PP est un matériau plus dur que le PE et que cela semble se traduire par une moindre déformation sous l'effet d'une force appliquée, une analyse plus approfondie permettrait de comprendre plus précisément les mécanismes d'usure et de déformation de ces matériaux.

Certains mécanismes ou phénomènes peuvent influencer ces mesures de dureté :

La dégradation thermique qui peut entraîner une diminution de leur poids moléculaire. Cela peut affecter la dureté du plastique recyclé. En général, un poids

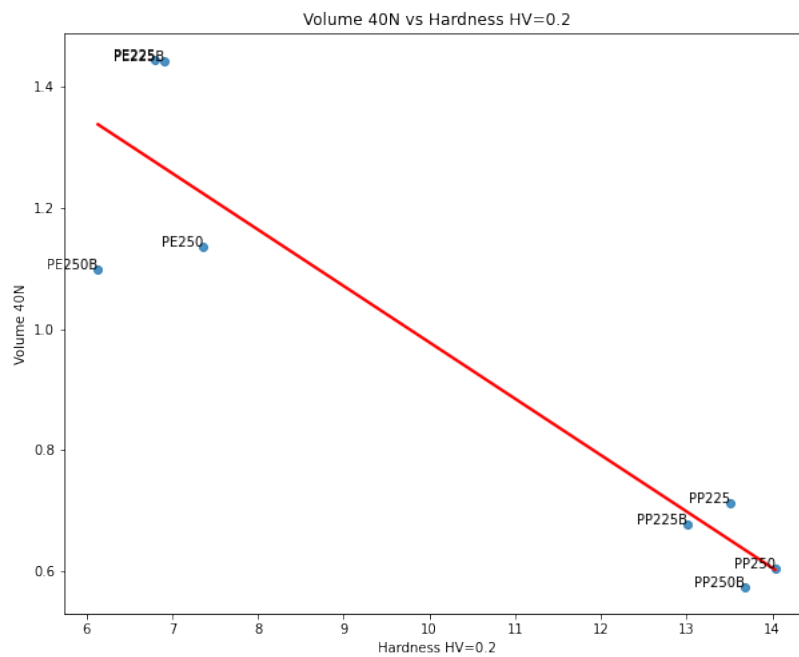


FIGURE 3.23 – Scatter plot des Micro dureté et des volumes de saillie pour une force appliquée de 40N

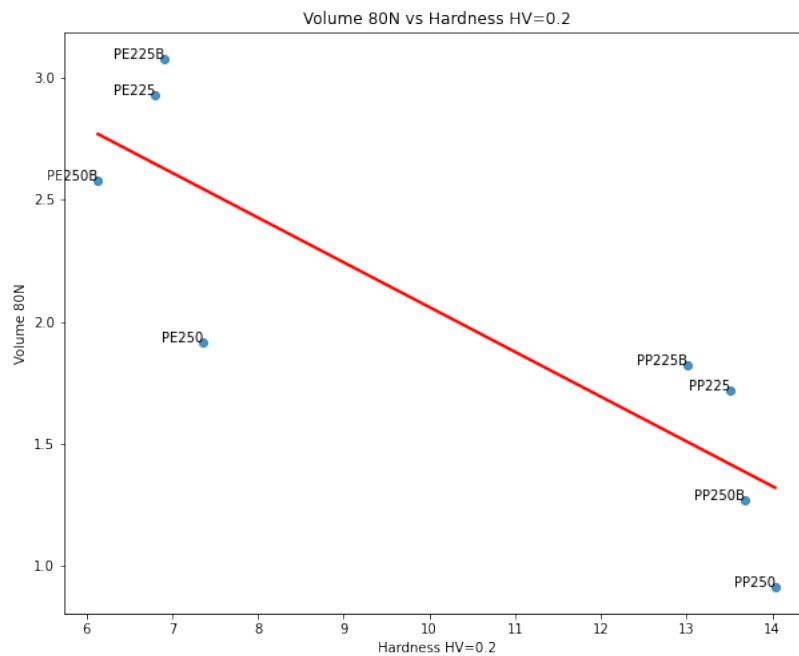


FIGURE 3.24 – Scatter plot des Micro dureté et des volumes de saillie pour une force appliquée de 80N

moléculaire plus faible entraîne une dureté plus faible.

La contamination : Lors du recyclage, les plastiques, même triés à la main comme Stéphanie, sont souvent mélangés avec d'autres types de plastiques ou de matériaux

- Encres et colorants : Les bouchons en plastique sont souvent marqués avec des dates, des logos et d'autres informations à l'aide d'encres qui peuvent contaminer le plastique lors du recyclage.
- Résidus alimentaires et boissons : Les bouchons peuvent être en contact avec divers produits alimentaires et boissons, qui peuvent laisser des résidus sur le plastique. Cela inclut le sucre, les huiles, les acides et d'autres substances qui peuvent interférer avec le processus de recyclage. Stéphanie a déjà rencontré certains problèmes avec le sucre en surface des bouchons de softs.
- Additifs plastiques : Certains bouchons peuvent également contenir des additifs plastiques, comme des plastifiants, des stabilisateurs UV, des antioxydants, etc., qui peuvent interférer avec le processus de recyclage.

ce qui peut affecter les propriétés du produit final et notamment la dureté.

3.4 Piste d'amélioration : ajout d'additifs pour améliorer différentes propriétés des plastiques recyclés

3.4.1 Le Talc

L'ajout de talc à des polymères comme le polypropylène (PP) et le polyéthylène (PE) est une pratique courante dans l'industrie automobile pour améliorer les propriétés mécaniques de diverses pièces, notamment les pare-chocs et les pièces intérieures. Le talc, en raison de sa structure en feuillets, agit comme un agent de nucléation efficace, favorisant la formation de cristaux lors du refroidissement du polymère fondu. Ce processus de cristallisation influence de nombreuses propriétés du polymère, telles que sa résistance, sa rigidité et sa résistance thermique. Le talc

agit également comme un agent de renforcement dans les composites polymères, augmentant la rigidité du matériau. Cela pourrait potentiellement réduire la déformation sous l'effet d'une force appliquée, comme celle d'un couteau sur une planche à découper. [50]

Selon une étude d'Ammar et al. (2017), un ajout de talc de 20% à un composite de PP pourrait être optimal pour augmenter la dureté et réduire la ductilité du matériau. Cela pourrait contribuer à réduire l'usure, ce qui serait bénéfique pour les applications comme les planches à découper. Cependant, l'augmentation de la fragilité pourrait également augmenter le risque de fissuration ou de rupture du matériau sous contrainte. [40]

En outre, il est important de considérer que l'ajout de talc pourrait compliquer le processus de recyclage du PP et du PE. Ces polymères purs peuvent être recyclés plus facilement que ceux chargés de talc, ce qui peut être un facteur important pour recycler la planche à découper en fin de vie.

L'ajout de talc dans les composites PP et PE pourrait être donc envisagé mais est-ce compatible avec une approche Low-Tech ?

Tout d'abord, le talc est une ressource largement disponible et relativement peu coûteuse. De plus, son incorporation dans les polymères ne nécessite pas de technologies de pointe et peut être réalisée avec des équipements de base.

Cependant, l'optimisation de la concentration de talc pour obtenir les propriétés mécaniques souhaitées peut nécessiter des essais et des ajustements. Il est également important de considérer les aspects environnementaux. Bien que le talc puisse améliorer certaines propriétés des composites PP et PE, son extraction et sa transformation ont un impact environnemental. De plus, comme mentionné précédemment, il peut compliquer le recyclage des polymères. Il serait donc essentiel de trouver un équilibre entre les avantages de l'ajout de talc et son impact environnemental.

D'autres additifs tel que les fibres de verre, les fibres de carbone et les minéraux tels que la silice ou la craie ou le sont souvent ajoutés au PP et au PE pour augmenter leur résistance et leur rigidité.

3.5 Conclusion

3.5.1 Ecoulement plastique vs Usure

Les tests de tribologie menés dans cette étude ont principalement permis de quantifier l'écoulement plastique du PP et PE plutôt que l'usure. L'écoulement plastique est tout de même une grandeur intéressante dans le cas des planches à découper. L'écoulement plastique, intervient lorsque le matériau est déformé de manière irréversible sous l'effet d'une charge.

Dans le cas des planches à découper, une pression significative est exercée sur la surface lors de la découpe d'aliments, entraînant un écoulement plastique, ceci peut conduire à la formation de sillons ou de rayures sur la surface de la planche, pouvant affecter son hygiène si des aliments ou des débris s'y accumulent. De plus, les saillies créées par cet écoulement plastique peuvent devenir plus susceptibles de se détacher du reste de la planche, conduisant à la contamination possible des aliments par des particules de plastique et à une usure accélérée de la planche.

L'étude de l'écoulement plastique est donc également intéressante pour étudier le comportement des matériaux sous contrainte et minimiser le risque de détachement de matière.

3.5.2 Température de mise en forme

Après avoir analysé l'influence de la température de mise en forme la dureté et les volumes de saillie, il est clair que la température joue un rôle important dans les propriétés finales des échantillons.

L'analyse par tomographie a permis d'observer de manière détaillée la structure interne des échantillons de PP et de PE formés à différentes températures.

Pour les échantillons de PE, des défauts sous forme de vides internes ont été observés. Ces vides, souvent présentés comme des "bulles", pourraient résulter d'un phénomène de dégazage interne lors du processus de mise en forme. Il semble qu'une température de mise en forme plus importante permette de diminuer la taille et les nombres de ces défauts.

Quant aux échantillons de PP, nous avons identifié des vides interstitiels entre les particules de PP. Ces défauts pourraient être la conséquence d'un compactage insuffisant lors de la mise en forme, résultant en un mauvais fusionnement des particules. Là aussi, une température de mise en forme plus élevée semble réduire le nombre et la taille de ces défauts.

Il est évident que ces défauts internes, principalement ceux du premier ordre comme les vides, ont un impact sur la structure globale du matériau, et par conséquent sur ses propriétés mécaniques. La température de mise en forme se présente comme un paramètre crucial pour contrôler ces défauts et optimiser ainsi les performances du matériau.

Il a été également observé que des températures de mise en forme plus élevées peuvent conduire à une diminution du volume de saillie potentiellement lié à une cristallinité accrue, en favorisant une meilleure organisation des chaînes polymères. Cependant, il est important de noter que dépasser une certaine température peut perturber cette organisation, entraînant une diminution de la cristallinité.

En ce qui concerne la dureté et le volume de saillie, les différences entre les températures de mise en forme de 225°C et 250°C ont été minimales. Bien que des variations puissent être observées, il est essentiel d'évaluer si ces différences ont une importance pratique ou significative dans le contexte d'utilisation prévu. Dans le cas présent, les différences constatées ne semblent pas être suffisamment signifi-

tives pour justifier l'utilisation d'une température de mise en forme plus élevée pour l'application planche à découper/tartiner.

Ainsi, il semble préférable pour Stéphanie de privilégier une température de mise en forme de 225°C, voire même une température inférieure, pour éviter de compromettre la cristallinité et pour obtenir des propriétés mécaniques satisfaisantes. Cela permettrait également de réduire les risques potentiels de dégradation thermique trop importante.

En plus des considérations techniques, il est important de souligner l'aspect écologique lié au choix de la température de mise en forme. En optant pour une température de 225°C, voire inférieure, il est possible de réduire la consommation d'électricité nécessaire au processus de mise en forme des échantillons. En effet, l'utilisation d'une température plus basse permet de diminuer la demande en énergie pour chauffer les granules de plastiques et le maintenir à la température requise.

Cependant, il convient de souligner que ces conclusions sont basées sur les résultats spécifiques obtenus dans le cadre de cette étude. Il serait intéressant poursuivre les recherches et les expérimentations pour affiner davantage les paramètres de mise en forme Low Tech, en tenant compte des spécificités du PE et PP et des objectifs visés. La température de mise en forme doit être considérée comme un paramètre essentiel, à contrôler et à optimiser en fonction des propriétés mécaniques souhaitées et des exigences de l'application finale des échantillons.

3.5.3 PP ou PE ?

En conclusion, l'étude comparative entre le polypropylène (PP) et le polyéthylène (PE) dans le contexte de la mise en forme de planches recyclées a révélé des différences significatives en termes de propriétés mécaniques et de comportement lors de l'utilisation. Ces résultats fournissent des indications précieuses pour orienter le choix du matériau en fonction des critères spécifiques tels que la résistance à l'usure et la déformation.

Les essais de dureté ont montré que le PP avait une dureté plus élevée que le PE, ce qui indique une résistance accrue aux rayures et à l'abrasion. De plus, le PP a montré une plus grande résistance à la déformation plastique sous l'effet des forces appliquées. Ces caractéristiques suggèrent que le PP pourrait être préférable dans des applications où une résistance mécanique plus élevée, une résistance à l'usure et une durabilité accrue sont nécessaires, telles que les planches à découper.

D'autre part, le PE a montré une plus grande capacité de déformation sous l'effet des forces appliquées, ce qui peut être bénéfique dans des situations où une flexibilité et une adaptation à des surfaces irrégulières sont requises. Cela pourrait être avantageux pour d'autres applications spécifiques.

Cependant, il est important de noter que les différences entre le PP et le PE en termes de propriétés mécaniques et de comportement sont relativement faibles. Les variations observées dans les volumes de saillie et les résultats de dureté peuvent être considérées comme négligeables dans d'autres contextes d'utilisation. Par conséquent, le choix final du matériau peut dépendre de considérations supplémentaires telles que la disponibilité ou les contraintes spécifiques de l'application.

Pour cette application de planche à découper/tartiner les résultats suggèrent que le PP peut offrir une meilleure résistance à l'usure, une dureté plus importante et une plus grande rigidité.

Chapitre 4

Low tech

4.1 Contexte

A l'heure actuelle, les débats sur la transition écologique et énergétique sont sur toutes les lèvres. Ceux-ci sont enfin reconnus comme urgents, mais bien souvent, on tente de répondre à ces questions et problématiques par les nouvelles technologies. Le développement durable est présenté comme la solution miracle qui nous permettra de mettre fin à cette crise écologique tout en pouvant maintenir la croissance économique et nos modes de vies.

Notre société de consommation, notre système technique mais aussi économique est maintenant confrontés à de nouvelles limites, celles planétaires. Les écosystèmes ne peuvent plus absorber les conséquences de notre mode de fonctionnement en effet le changement climatique, accumulation des déchets et autres polluants, déclin de la biodiversité en sont malheureusement témoins. De plus, la plupart de nos technologies reposent encore actuellement sur l'utilisation de ressources fossiles (métaux, minéraux, énergies fossiles) ce qui entraîne un réel risque de pénurie dans un futur plus ou moins proche. Par conséquent, la question des Low-Tech et la manière d'utiliser les technologie redevient primordiale.

L'expression "Low-Tech" ou en français "basse technologie" reste compliquée à définir. Le Low Tech est avant tout une démarche intellectuelle, une façon de repenser l'utilisation de nos technologies. Tout ça dans le but de se diriger vers la

préservation, la restauration des écosystèmes, vers l'économie des ressources épuisables. Mais ce n'est pas pour autant que le Low-Tech s'oppose au progrès et à l'innovation. Le Low Tech peut tantôt s'inspirer d'anciens savoir faire, tantôt d'innovation plus récentes.

Le Low-Tech est avant tout une critique de l'excès technologique mais aussi une volonté de se réapproprier la technique et les différents savoirs.

On peut définir certains objectifs du Low Tech :

- Réduire de manière significative la consommation de matières et d'énergies
- Réduire la production de déchets
- Réduire le GWP et les impacts environnementaux
- Permettre un certain degré d'autonomie au niveau de l'usage, permettre une maîtrise locale à la portée de tous.
- Améliorer la durabilité des technologies via simplicité, robustesse mais aussi réemploi et libre accès des savoirs et savoirs faire

Grâce à ces objectifs la On peut déjà mieux définir le Low Tech en les séparant en différents critères, c'est de cette manière-là que Arthur Keller et Emilien Bournigal définissent la démarche Low Tech via 9 critères répartis en 3 groupes : **[bournigal_Low-tech_2022]**

- Durabilité forte
- Résilience collective
- Transformation culturelle

De par leurs critères on ne peut toujours pas réellement si un objet ou une technique est Low Tech ou non mais on peut comparer si un objet ou une technique est plus ou moins Low Tech que d'autres.

Selon " la fabrique écologique" pour intégrer la démarche Low tech de manière dynamique en se posant 3 questions**[35]** :

- **Pourquoi produit-on ?** Cette question concerne surtout nos besoins. Est-ce vraiment nécessaire de de produire l'objet en question ou est-ce superflux ? Ici

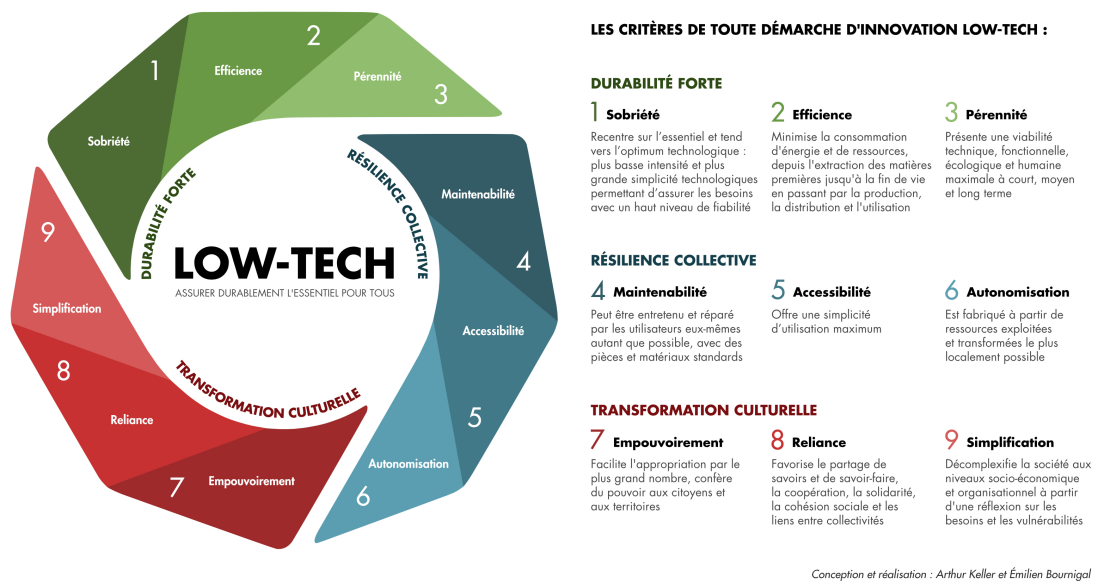
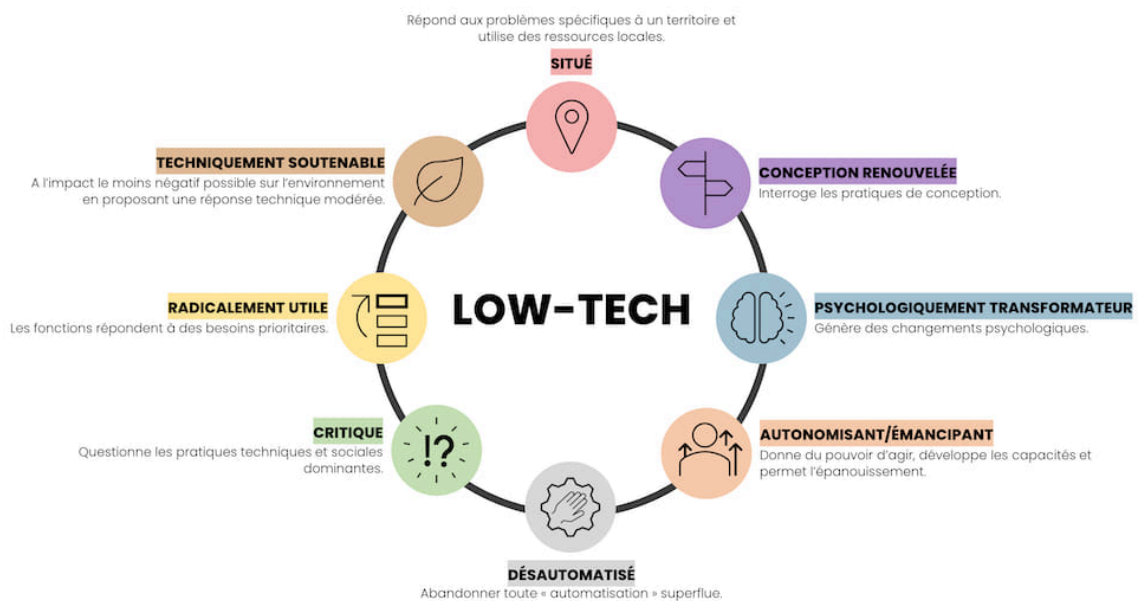


FIGURE 4.1 – Définition de la démarche Low-Tech selon Keller et Bournigal [21]



Adapté de : Martin, A., Colin, C. et Gaultier, A. (2022). Cartographie du concept low-tech : guider la conception vers des techniques soutenables. Actes du 56ème Congrès de la SELF, Vulnérabilités et risques émergents : penser et agir ensemble pour transformer durablement. Genève, 6 au 8 juillet 2022.

FIGURE 4.2 – Les 8 caractéristiques du Low Tech [29]

la question est parfois délicate car il est compliqué de définir objectivement la frontière en un besoin fondamental et le superflu.

— **Que produit-on ?** Il est question ici d'augmenter la durée de vie de ce que

nous produisons, de se débarrasser un maximum de produits jetable, de réfléchir sur la conception, de bannir l'obsolescence programmée.

- **Comment produit-on ?** Cette dernière question consiste à remettre en cause nos différents mode de production. Il faut éviter la course au rendement, à la rentabilité économique et surtout développer des ateliers locaux à petite échelle, à taille humaine.

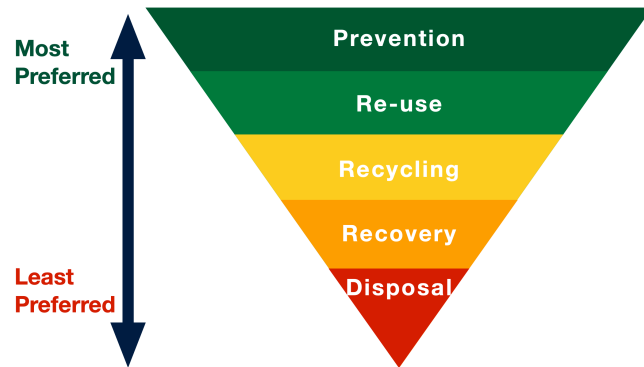


FIGURE 4.3 – Pyramide de gestion des déchets [60]

On peut également tenter de mettre en lien cette pyramide de gestion des déchets et la philosophie Low Tech, en considérant que cette dernière favorise la prévention des déchets par la simplicité et la réduction de la dépendance technologique. Elle encourage également la réutilisation et le recyclage grâce à des solutions durables et facilement réparables. Le Low-Tech prône donc les 3 catégories préférables point de vue gestion des déchets.

4.2 Le Low Tech et son Impact Social Positif - Retour vers des Technologies Conviviales

L'essor et l'adoption du Low Tech peuvent avoir des effets significatifs et bénéfiques sur nos relations sociales. Dans le passé, ces technologies étaient même qualifiées de "technologies conviviales" pour insister sur le fait qu'il permet de créer et renforcer les liens sociaux.

D’abord, les technologies Low Tech favorisent l’interaction humaine, en opposition aux technologies de pointe qui peuvent quant à elle isoler l’individu, le Low tech Tend à réunir les gens, à promouvoir la collaboration et le partage des connaissances. Les outils et systèmes utilisés par le Low Tech sont souvent simples à comprendre et à réparer, ce qui entraîne l’échange de compétences et l’apprentissage mutuel.

De plus, le Low Tech peut aider à démocratiser l’accès à la technologie. Étant généralement moins coûteux et plus facilement réparable, il peut être une alternative intéressante pour les communautés plus défavorisées ou pour les zones reculées, en rendant les services essentiels plus accessibles.

Enfin, le Low Tech peut contribuer à réduire la fracture numérique. Par sa simplicité, il offre une porte d’entrée plus douce à la technologie pour ceux qui sont réticents ou qui éprouvent des difficultés à s’adapter à la complexité croissante de la technologie moderne.

Sur un plan plus personnel, ma propre expérience avec le Low Tech m’a permis de faire une rencontre importante. J’ai eu l’occasion de rencontrer Stéphanie, une personne qui partage les belles valeurs incarnées par la philosophie Low Tech. Cette rencontre a non seulement enrichi ma compréhension de ce cheminement qu’est le Low Tech, mais a également renforcé mon appréciation pour la manière dont cette approche peut tisser des liens solides et authentiques entre les personnes.

L’une des perspectives intéressantes issues de ce travail est l’intérêt porté par le lunetier Seed [\[26\]](#), qui a contacté Stéphanie suite à la découverte de ses objets obtenus par recyclage des bouchons. Ce lunetier envisage d’explorer la possibilité de fabriquer des branches de lunettes à partir de bouchons recyclés, ce qui constitue une application innovante. Ce développement illustre non seulement l’attrait croissant pour le recyclage low-tech, mais aussi le potentiel de cette approche pour inspirer de nouvelles applications durables dans diverses industries. Cette collaboration potentielle pourrait ouvrir la voie à d’autres opportunités intéressantes, soulignant la pertinence et l’impact significatif du travail réalisé par Stéphanie.

En somme, le Low Tech est loin d'être une régression technologique. C'est également une réponse sociétale qui cherche à replacer l'humain au cœur de l'interaction technologique, favorisant la cohésion sociale, l'échange et la solidarité, tout en offrant une alternative durable et accessible à tous.

4.3 Le Low Tech et son Impact Économique - Vers un Nouveau Modèle Économique Soutenable

L'intégration des technologies Low Tech dans l'économie actuelle présente des opportunités uniques et répond à plusieurs problèmes inhérents à notre modèle économique actuel.

Tout d'abord, le Low Tech offre une alternative aux coûts croissants bien trop souvent associés à la haute technologie. En minimisant la dépendance à l'égard des technologies de pointe à la fois coûteuses et complexes, les entreprises peuvent réaliser des économies significatives sur le long terme. De plus, la durabilité et la réparabilité des technologies Low Tech réduisent les coûts liés au remplacement fréquent des équipements.

Deuxièmement, le Low Tech propose une solution à la problématique de l'obsolescence programmée. En mettant l'accent sur la durabilité et la simplicité, le Low Tech apporte un contraste à la tendance actuelle des produits à avoir une durée de vie limitée, favorisant une consommation à la fois plus responsable et durable.

Cependant, pour que le Low Tech soit pleinement intégré et popularisé, des changements structurels peuvent être nécessaires. Cela pourrait impliquer une redéfinition des normes de production, une révision des politiques fiscales pour favoriser les solutions Low Tech, ainsi que des efforts d'éducation pour démontrer les avantages de ces technologies.

Par ailleurs, le développement d'un écosystème entrepreneurial autour du Low tech est également essentiel. Cela nécessite la création d'incitations pour les startups et les entreprises qui cherchent à développer et à commercialiser des produits Low tech.

En conclusion, le Low tech offre des solutions prometteuses face aux défis économiques de notre époque, en favorisant une consommation plus durable et responsable, tout en ouvrant la voie à un nouveau modèle économique plus soutenable et équitable.

4.4 Éco-design et Low Tech - Alliances pour une Durabilité Accrue

L'éco-design et le Low tech sont deux philosophies de conception qui partagent un objectif commun de durabilité. Ils s'efforcent de minimiser l'impact environnemental à travers le cycle de vie d'un produit, de sa conception à son élimination.

L'éco-design est une démarche qui vise à minimiser l'empreinte écologique d'un produit tout au long de son cycle de vie. Il considère toutes les étapes, de l'extraction des matières premières à la production, l'utilisation, et finalement au recyclage ou à l'élimination.

De même, le Low tech se préoccupe également de l'ensemble du cycle de vie du produit. Il promeut la durabilité, la simplicité et la résilience en favorisant des designs qui sont moins dépendants de ressources non renouvelables, faciles à réparer, et construits pour durer. Cela se traduit par une réduction des déchets et une utilisation plus efficace des ressources.

Toutefois, la principale distinction réside dans leur approche de la technologie. Le Low tech tend à privilégier les solutions moins technologiquement complexes, tandis que l'éco-design est ouvert à l'utilisation de technologies avancées si elles contribuent à l'efficacité énergétique et à la durabilité globale.

Malgré cette différence, l'éco-design et le Low tech peuvent se compléter efficacement. L'intégration des principes de simplicité et de résilience du Low tech dans l'éco-design peut mener à des solutions encore plus durables et respectueuses de l'environnement, tout en restant accessibles et bénéfiques pour la société dans son ensemble.

4.5 Conclusion

Il est également important de prendre en compte non seulement les aspects techniques et mécaniques des matériaux lors du processus de mise en forme, mais aussi les aspects esthétiques et créatifs. Dans le cas de Stéphanie, qui trie les bouchons par couleur et utilise sa créativité pour créer des objets uniques, il existe une dimension esthétique supplémentaire qui ajoute de la valeur au recyclage Low Tech. Cette valeur esthétique ajoutée n'est malheureusement rarement obtenue dans le cadre du recyclage de masse traditionnel.

Après ce travail il est évident que le low tech est UNE solution mais malheureusement ce n'est pas LA solution. Pour gérer les montagnes de déchets actuels qu'ils soient industriels ou post consommateur il faudra avoir recours à une démarche industrielle automatisé permettant le recyclage de grand volume.

Pour le futur il est nécessaire de repenser la façon dont on crée les objets en réfléchissant à faciliter le tri, la collecte, le démontage, la réparabilité. C'est cette philosophie que prône le Low-Tech mais aussi l'éco-conception.

Le Low Tech garde tout de même un intérêt au niveau local en plus petit volume. Il est donc impératif d'encourager une démarche citoyenne au niveau local pour cela il est important de revaloriser les déchets et de leur conférer une valeur ajoutée. Ce que fait Stéphanie en apportant une dimension plus esthétique au recyclage.

Le Low tech reste cependant très intéressant aussi dans les pays moins développés où les déchets sont mal gérés. Le LCA dans ce travail a permis de démontrer qu'en Europe et surtout en Belgique les techniques de recyclage et d'incinération présentent des impacts similaires sur l'environnement que le recyclage Low Tech. Ce n'est pas le cas pour le monde entier, trop de pays ne traitent pas leur déchets.

D'un point de vue économique, aujourd'hui, la situation n'est pas bonne pour le recyclage. Les granules de plastiques obtenus par recyclage sont ensuite mis sur le marché en direct concurrence avec les granules vierges. Prix de la matière vierge fortement diminué par rapport au regain économique des années précédentes. Le prix de la matière recyclée est alors trop important par rapport au prix de la matière vierge. Par conséquent certaines usines de recyclages tournent à bas régime et ferment temporairement certaines lignes de recyclage. Seul exception pour le PET, les transformateurs de PET eux sont tenus par la législation européenne d'utiliser du PET recyclé ce qui entraîne une hausse de son prix et permet de se maintenir par rapport au PET vierge. [15]

Chapitre 5

Conclusion

Pour conclure, le LCA a permis de mettre en évidence que le recyclage tel qu'opéré par Stéphanie ne présente pas un impact plus néfaste sur l'environnement que les scénarios de recyclage industriel et d'incinération avec récupération d'énergie. Au contraire il apporte une valeur ajoutée supplémentaire de par son esthétique.

Le LCA a également permis de mettre en lumière les processus qui ont le plus d'impact sur l'environnement à savoir l'étape de mise en forme et celle de la collecte. C'est sur ces processus la que Stéphanie peut travailler afin de réduire encore son impact environnemental.

Pour la caractérisation du matériau il a été montré par tomographie que la température de mise en forme jouait un rôle crucial pour l'homogénéité du matériau. Les défauts du premier ordre sont les premiers à corriger si on veut espérer des applications plus concrètes pour ces plastiques recyclés comme le projet du lunetier Seed.

L'utilisation du polypropylène semble plus adéquate pour l'application planche à découper en minimisant le risque de détachement de matière et donc le risque d'ingestion de plastiques. Il serait également intéressant d'étudier plus en détail l'influence de la cristallinité et le lien température de mise en forme cristallinité sur les propriétés de ces échantillons.

Annexes

.1 Premier essai de tribologie

Pour les premiers essais, une bille de 6,3 mm de diamètre a été utilisée comme élément de contact. Elle a été appliquée sur les échantillons de matériau avec une force constante de 40 Newtons pendant une durée de 20 minutes. La bille a été mise en rotation sur un cercle de 10mm de diamètre à une vitesse de 10 secondes par tour.

Après avoir effectué ces tests de tribologie, les résultats ont semblé montrer une amélioration notable des propriétés de surface du matériau testé, plutôt qu'une détérioration ou une usure. Visuellement, aucun détachement de matière n'était apparent.

Le PP et le PE étant tous deux des polymères semi-cristallins, Lorsqu'une force est appliquée, comme ici dans le test de tribologie, les zones cristallines peuvent se réarranger et s'orienter dans la direction de la force. Cela pourrait expliquer l'aspect "lissé" observé à la surface des échantillons. [13]

De plus, le frottement généré par le test de tribologie pourrait provoquer un échauffement localisé ce qui peut également entraîner une hausse du degré de cristallinité. C'est une hypothèse plausible, mais elle devrait être confirmée par des mesures directes de température de la surface pendant le test. Cette densification de la surface pourrait améliorer la résistance à l'usure des échantillons. [5]

En outre, le lissage et la densification de la surface pourraient réduire la porosité de la surface et, par conséquent, sa tendance à retenir des particules de saleté ou des bactéries, ce qui est un avantage particulièrement important pour les planches à découper.

Cependant, il est important de noter que ces mécanismes sont des hypothèses basées sur de simples observations faites et les connaissances générales des propriétés du PP et du PE. Des études complémentaires seraient nécessaires pour confirmer ces mécanismes et comprendre plus en détail comment le frottement et la force appliquée affectent la structure et les propriétés de ces polymères.



FIGURE 1 – Premier essai tribologie

Bibliographie

- [1] URL : <https://www.iso.org/obp/ui/fr/#iso:std:iso:14044:ed-1:v1:en> (visité le 25/05/2023).
- [2] Dimitris S. ACHILIAS et al. *Recent Advances in the Chemical Recycling of Polymers (PP, PS, LDPE, HDPE, PVC, PC, Nylon, PMMA)*. en. IntechOpen, mars 2012. ISBN : 9789535103271. DOI : [10.5772/33457](https://doi.org/10.5772/33457). URL : <https://www.intechopen.com/chapters/32560> (visité le 31/05/2023).
- [3] G.G. ARZOUMANIDIS et al. « Commercial polypropylene catalysts ». en. In : *Catalysis Today* 13.1 (mars 1992), p. 59-71. ISSN : 09205861. DOI : [10.1016/0920-5861\(92\)80187-R](https://doi.org/10.1016/0920-5861(92)80187-R). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/092058619280187R> (visité le 31/05/2023).
- [4] Rafael AURAS, Bruce HARTE et Susan SELKE. « An Overview of Polylactides as Packaging Materials ». en. In : *Macromolecular Bioscience* 4.9 (sept. 2004), p. 835-864. ISSN : 1616-5187, 1616-5195. DOI : [10.1002/mabi.200400043](https://doi.org/10.1002/mabi.200400043). URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/mabi.200400043> (visité le 31/05/2023).
- [5] J. AURREKOETXEA et al. « Effects of recycling on the microstructure and the mechanical properties of isotactic polypropylene ». en. In : *Journal of Materials Science* 36.11 (juin 2001), p. 2607-2613. ISSN : 1573-4803. DOI : [10.1023/A:1017983907260](https://doi.org/10.1023/A:1017983907260). URL : <https://doi.org/10.1023/A:1017983907260> (visité le 31/05/2023).
- [6] Luc AVEROUS. « Polymères biodégradables et biosourcés : des matériaux pour un futur durable ». » In : *L'Actualité Chimique* 375-376 (2013), p. 83-90.
- [7] María P. AZNAR et al. « Plastic waste elimination by co-gasification with coal and biomass in fluidized bed with air in pilot plant ». In : *Fuel Processing*

- Technology* 87.5 (2006), p. 409-420. ISSN : 0378-3820. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2005.09.006>. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037838200500189X>.
- [8] Lorenzo BENINI et al. *Normalisation method and data for Environmental Footprints*. en. Déc. 2014. DOI : [10.2788/16415](https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC91531). URL : <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC91531> (visité le 01/06/2023).
- [9] Philippe BIHOUIX. *L'âge des low tech : vers une civilisation techniquement soutenable*. Anthropocène Seuil. Paris : Éditions du Seuil, 2014. ISBN : 9782021160727.
- [10] Émilien BOURNIGAL. *Low-tech : définition et exemples de LA démarche d'innovation*. fr-FR. Mars 2022. URL : <https://lowtechnation.com/low-tech/> (visité le 05/06/2023).
- [11] Julian CARREY et Sébastien LACHAIZE. « La recherche scientifique en Low-Tech : définition, réflexions sur les pistes possibles, et illustration avec un projet de métallurgie solaire ». fr. In : *La Pensée écologique* 5.1 (2020), p. 7-7. ISSN : 2558-1465. DOI : [10.3917/lpe.005.0007](https://www.cairn.info/revue-la-pensee-ecologique-2020-1-page-7.htm). URL : <https://www.cairn.info/revue-la-pensee-ecologique-2020-1-page-7.htm> (visité le 25/05/2023).
- [12] Rédigé par : Julian J. CARREY, S. LACHAIZE et G. CARBOU. *Les low-techs comme objet de recherche scientifique. Vers une société pérenne, équitable et conviviale – La pensée écologique*. fr-FR. URL : <https://lapenseeecologique.com/6312-2/> (visité le 25/05/2023).
- [13] Germain CLAVIER. « Étude à l'échelle moléculaire des propriétés mécaniques des polymères semi-cristallins ». fr. Thèse de doct. Université Paris Saclay (COmUE), nov. 2017. URL : <https://theses.hal.science/tel-01682585> (visité le 01/06/2023).
- [14] Ivan Miguel DE CACHINHO CORDEIRO et al. « Pyrolysis and combustion characterisation of HDPE/APP composites via molecular dynamics and CFD simulations ». en. In : *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 163 (mai 2022), p. 105499. ISSN : 01652370. DOI : [10.1016/j.jaap.2022.105499](https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0165237022000699). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0165237022000699> (visité le 31/05/2023).
- [15] Philippe DE GROOTE. *Interview de Philippe De Groote Polymères*. Avr. 2023.

- [16] *Déchets marins*. Ministères Écologie Énergie Territoires. URL : <https://www.ecologie.gouv.fr/dechets-marins>.
- [17] *Demi-masque réutilisable sans entretien 3M™, Filtres FFA2P3R D, 06942+*. Mars 2023. URL : https://www.3mbelgique.be/3M/fr_BE/p/d/v000277494/.
- [18] Plastic Recyclers EUROPE. *HDPE PP Market in Europe*. 2022. URL : https://www.plasticsrecyclers.eu/wp-content/uploads/2022/10/study-on-an-increased-mechanical-recycling-target-for-plastics_bois.pdf.
- [19] Plastic Recyclers EUROPE. *Study on an increased mechanical recycling target for plastics bois*. 2022. URL : https://www.plasticsrecyclers.eu/wp-content/uploads/2022/10/study-on-an-increased-mechanical-recycling-target-for-plastics_bois.pdf.
- [20] *European Plastics Converters*. en. URL : <https://www.plasticsconverters.eu> (visité le 25/01/2023).
- [21] *Fichier :Infographie low-tech.jpg — Wikipédia*. fr. Sept. 2021. URL : https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Infographie_low-tech.jpg (visité le 05/06/2023).
- [22] Alain GIOCOSA. « Matériaux Plastiques dans le bâtiment ». In : *SFIP plastic* (2013).
- [23] Aklilu T. HABTEWOLD, Demiss A. AMBIE et Wondwossen B. EREMED. « Solar assisted pyrolysis system for High-Density polyethylene plastic waste to fuel conversion ». In : *AIMS Energy* 8.3 (2020), p. 455-473. DOI : [10.3934/energy.2020.3.455](https://doi.org/10.3934/energy.2020.3.455). URL : <http://cs.pontdecheruy.free.fr/livres/livre2/214.htm>.
- [24] Henk HAGEN, Jaap BOERSMA et Gerard van KOTEN. « Homogeneous vanadium-based catalysts for the Ziegler-Natta polymerization of alpha-olefins ». eng. In : *Chemical Society Reviews* 31.6 (nov. 2002), p. 357-364. ISSN : 0306-0012. DOI : [10.1039/b205238e](https://doi.org/10.1039/b205238e).
- [25] Jean-Louis HALARY et al. « Matériaux polymères et développement durable ». In : *L'actualité chimique* (2010), 41 à 53.

- [26] *Home - Seed*. en-US. URL : <https://seed-lunettesdurables.be/>, %20https://seed-lunettesdurables.be/ (visité le 05/06/2023).
- [27] J. HOPEWELL, R. DVORAK et E. KOSIOR. « Plastics recycling : challenges and opportunities ». In : *Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences* 364.1526 (2009), p. 2115-2126.
- [28] Igor A. IGNATYEV, Wim THIELEMANS et Bob VANDER BEKE. « Recycling of Polymers : A Review ». en. In : *ChemSusChem* 7.6 (juin 2014), p. 1579-1593. ISSN : 18645631. DOI : [10.1002/cssc.201300898](https://doi.org/10.1002/cssc.201300898). URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cssc.201300898> (visité le 31/05/2023).
- [29] *Imaginaire : la low tech doit composer avec les usages et les comportements / Goodd*. fr-FR. URL : <https://goodd.fr/imaginaire-la-low-tech-doit-composer-avec-les-usages-et-les-comportements/> (visité le 05/06/2023).
- [30] *Indenteur Vickers et empreinte résiduelle après essai*. URL : https://www.researchgate.net/publication/260942974_Modifications_des_proprietes_physico-chimiques_et_de_la_microstructure_de_l%5C%27aluminium_apres_nitruration_par_implantation_d%5C%27ions_multicharges/figures?lo=1.
- [31] Tongsai JAMNONGKAN et al. « Towards a Circular Economy : Study of the Mechanical, Thermal, and Electrical Properties of Recycled Polypropylene and Their Composite Materials ». en. In : *Polymers* 14.24 (déc. 2022), p. 5482. ISSN : 2073-4360. DOI : [10.3390/polym14245482](https://doi.org/10.3390/polym14245482). URL : <https://www.mdpi.com/2073-4360/14/24/5482> (visité le 04/06/2023).
- [32] *La valorisation énergétique*. Mai 2023. URL : <http://www.uvelia.be/index.php?page=la-valorisation-energetique>.
- [33] Hee-Jong LEE, Yeong-Koo YEO et Jin Yang CHANGN. « Modeling of industrial high pressure autoclave polyethylene reactor including decomposition phenomena ». en. In : *Korean Journal of Chemical Engineering* 17.2 (mars 2000), p. 223-229. ISSN : 1975-7220. DOI : [10.1007/BF02707147](https://doi.org/10.1007/BF02707147). URL : <https://doi.org/10.1007/BF02707147> (visité le 02/06/2023).

- [34] *Low-tech Lab – Accueil*. fr. URL : <https://lowtechlab.org/fr> (visité le 25/05/2023).
- [35] *Low-tech Lab – Vers des technologies sobres et résilientes – Pourquoi et comment développer l'innovation « low-tech » ?* fr. URL : <https://lowtechlab.org/fr/la-low-tech/ressource-recGbbeSOMKhajjac> (visité le 25/05/2023).
- [36] Christophe MADAM. « La valorisation des matières plastiques en fin de vie : Etat des lieux et propositions d'amélioration ». Thèse de doct. ULB, 2003. URL : https://mem-envi.ulb.ac.be/Memoires_en_pdf/MFE_02_03/MFE_Madam_02_03.pdf.
- [37] Laurence W. McKEEN. *The effect of temperature and other factors on plastics and elastomers*. Third edition. PDL handbook series. Amsterdam : William Andrew, an imprint of Elsevier, 2014. ISBN : 9780323310161.
- [38] Nik Mizamzul MEHAT et Shahrul KAMARUDDIN. « Optimization of mechanical properties of recycled plastic products via optimal processing parameters using the Taguchi method ». en. In : *Journal of Materials Processing Technology* 211.12 (déc. 2011), p. 1989-1994. ISSN : 09240136. DOI : [10.1016/j.jmatprotec.2011.06.014](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.06.014). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013611001841> (visité le 25/05/2023).
- [39] Rolf MÜLHAUPT. « Green Polymer Chemistry and Bio-based Plastics : Dreams and Reality ». en. In : *Macromolecular Chemistry and Physics* 214.2 (jan. 2013), p. 159-174. ISSN : 10221352. DOI : [10.1002/macp.201200439](https://doi.org/10.1002/macp.201200439). URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/macp.201200439> (visité le 31/05/2023).
- [40] Ammar O et al. « Talc as Reinforcing Filler in Polypropylene Compounds : Effect on Morphology and Mechanical Properties ». In : *Polymer Sciences* 3.2 (0), p. 0–0. ISSN : 2471-9935. DOI : [10.4172/2471-9935.100023](https://doi.org/10.4172/2471-9935.100023). URL : <https://www.primescholars.com/> (visité le 04/06/2023).
- [41] Tim A. OSSWALD. *Understanding polymer processing : processes and governing equations*. 2nd edition. Munich : Cincinnati : Hanser Publishers ; Hanser Publications, 2017. ISBN : 9781569906477.

- [42] Jyotishkumar PARAMESWARANPILLAI et al., éd. *Recent Developments in Plastic Recycling*. en. Composites Science and Technology. Singapore : Springer Singapore, 2021. ISBN : 9789811636264 9789811636271. DOI : [10.1007/978-981-16-3627-1](https://doi.org/10.1007/978-981-16-3627-1). URL : <https://link.springer.com/10.1007/978-981-16-3627-1> (visité le 25/05/2023).
- [43] Jyotishkumar PARAMESWARANPILLAI et al., éd. *Recent developments in plastic recycling*. eng. Composites science and technology. Singapore : Springer, 2021. ISBN : 9789811636271 9789811636264 9789811636295.
- [44] C. PATTANAKUL et al. « Properties of recycled high density polyethylene from milk bottles ». In : *Journal of Applied Polymer Science* 43.11 (déc. 1991), p. 2147-2150. ISSN : 00218995, 10974628. DOI : [10.1002/app.1991.070431122](https://doi.org/10.1002/app.1991.070431122). URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/app.1991.070431122> (visité le 31/05/2023).
- [45] *PE*. URL : <https://polymerdatabase.com/Commercial%5C%20Polymers/HDPE.html> (visité le 31/05/2023).
- [46] *PLASTICS RECYCLING INDUSTRY IN EUROPE*. 2021. URL : <https://www.plasticsrecyclers.eu/publications/>.
- [47] *Plastiques, Risque et Analyse Thermique PE*. Fév. 2023. URL : https://www.inrs.fr/dms/plastiques/PolymerePlastiques/PLASTIQUES_polymere_13-1/POLYMERPE.pdf.
- [48] *Plastiques, Risque et Analyse Thermique PP*. Fév. 2023. URL : https://www.inrs.fr/dms/plastiques/PolymerePlastiques/PLASTIQUES_polymere_19-6/POLYMERPP.pdf.
- [49] *PP*. URL : <https://polymerdatabase.com/Commercial%5C%20Polymers/PP.html> (visité le 31/05/2023).
- [50] Tjprc PUBLICATION. « EFFECT OF TALC ON BENDING STRENGTH OF POLYPROPYLENE COMPOSITES ». In : *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD)* (août 2013). URL : https://www.academia.edu/4133872/EFFECT_OF_TALC_ON_BENDING_STRENGTH_OF_POLYPROPYLENE_COMPOSITES (visité le 04/06/2023).

- [51] K. RAGAERT, L. DELVA et K. VAN GEEM. « Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste ». In : *Waste Management* 69 (2017), p. 24-58.
- [52] Plastic RECYCLERS. *Plastics the facts*. 2018. URL : <https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2021/10/2018-Plastics-the-facts.pdf>.
- [53] L'Institut Paris REGION. *La vie low-tech en 2040*. fr. URL : <https://www.institutparisregion.fr/economie/commerce-et-consommation/la-vie-low-tech-en-2040/> (visité le 25/05/2023).
- [54] S. M. AL-SALEM, P. LETTIERI et J. BAEYENS. « Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW) : A review ». In : *Waste Management* 29.10 (2009), p. 2625-2643.
- [55] *Say hi to the Precious Plastic Universe*. URL : <https://preciousplastic.com/> (visité le 30/05/2023).
- [56] L. SHEN, J. HAUFE et M. K. PATEL. *Product overview and market projection of emerging bio-based plastics PRO-BIP 2009*. Rapp. tech. 243. European Polysaccharide Network of Excellence (EPNOE) et European Bioplastics, 2009, p. 1-245.
- [57] Estelle SPOTO. *Les low-tech prennent leur envol à Liège*. fr. Mai 2023. URL : <https://www.lalibre.be/planete/inspire/2022/09/26/les-low-tech-prennent-leur-envol-a-liege-HASAPOBZUVASTGX6NZDKI5NEHM/> (visité le 25/05/2023).
- [58] STATISTA INFOGRAPHIES. *Infographie : 70 ans d'industrie plastique*. 2020. URL : <https://fr.statista.com/infographie/20457/evolution-de-la-production-mondiale-de-plastique>.
- [59] *Tables des masses volumiques de diverses substances*. fr-FR. URL : <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Masse-volumique-page-2.html> (visité le 30/05/2023).
- [60] *What is the Waste Hierarchy?* en-GB. URL : <https://ismwaste.co.uk/help/what-is-the-waste-hierarchy> (visité le 05/06/2023).

- [61] WIKIPÉDIA. *LCA framework*. Accessed on : 16/01/2023. 2023. URL : https://fr.wikipedia.org/wiki/Analyse_du_cycle_de_vie#/media/Fichier:Etapes-acv.png.
- [62] M.W. WOO et al. « Melting behavior and thermal properties of high density polythylene ». In : *Polymer Engineering & Science* 35 (1995), p. 151-156. DOI : [10.1002/pen.760350205](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/pen.760350205). URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/pen.760350205>.

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN
École polytechnique de Louvain

Rue Archimède, 1 bte L6.11.01, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique | www.uclouvain.be/epl