

Chapitre 1 : Introduction et objectifs

1.1 Définitions et production globale de plastique

Les plastiques forment une classe de matériaux relativement moderne. Synthétisé pour la première fois en 1862 par Alexander Parkes dans le but de produire un substitut à l'ivoire pour la fabrication de boules de billard, le Parkesine (nitrocellulose) a été le premier polymère synthétisé en laboratoire [1]. En quelques décennies seulement, le plastique s'est imposé comme un matériau dominant dans plusieurs secteurs manufacturiers, que ce soit pour la production d'emballages, de textiles, de jouets, d'articles de sports, d'appareils électroménagers et électroniques, ou l'agriculture. Les plastiques sont aussi communément employés dans l'industrie des transports, de la construction et du génie biomédical. On estime la production mondiale de plastique à 300 millions de tonnes métriques, avec un taux de croissance annuel d'environ 4% [2]. Une portion importante sert à la manufacture d'emballages, soit près de 40% (Figure 1.1). Les plastiques de consommation courante sont presque tous dérivés d'hydrocarbures, et on estime que 8% des ressources en pétrole fournissent le matériel et l'énergie nécessaire à la production actuelle de plastique [3]. Bien qu'il s'agisse d'un secteur connaissant une croissance vigoureuse, les polymères biosourcés ne représentent présentement que 0,2% de la production globale de plastique [4].

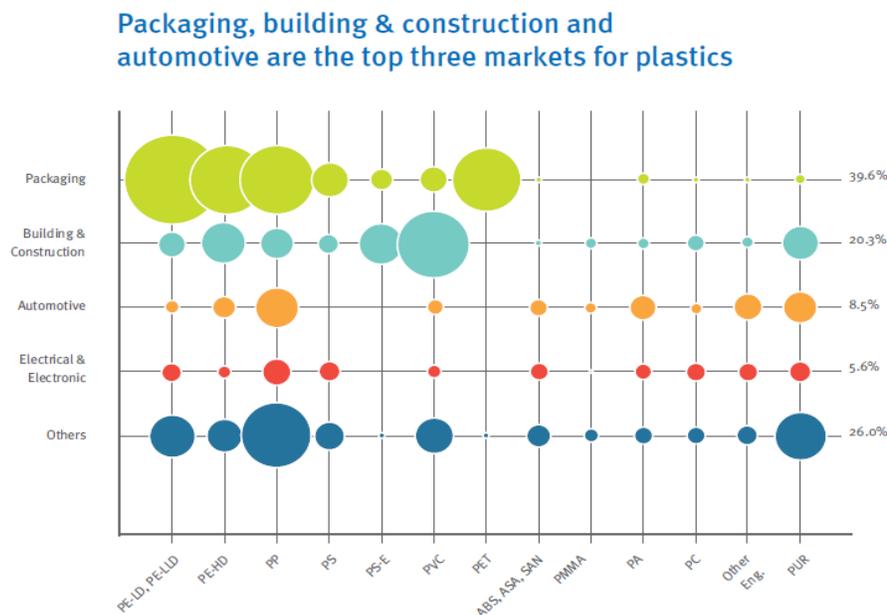


Figure 1.1: Répartition des plastiques par secteur manufacturier (et polymères utilisés). Source : [2].

Les plastiques de consommation courante sont faits à partir de polymères (molécules à base de carbone constituées d'un enchaînement répété d'une ou deux unités de base). Ceux-ci sont sélectionnés en fonction de leurs propriétés spécifiques. Le polyéthylène téréphtalate (PET) convient bien à l'emballage alimentaire car il est clair et possède d'excellentes propriétés barrières à l'oxygène et à l'humidité. Le polypropylène (PP) et le polyéthylène haute densité (HDPE) possèdent une bonne résistance aux acides et solvants et sont utilisés pour emballer les savons et détergents domestiques. Le polyvinyle chloré (PVC) se compare avantageusement aux autres polymères en termes de propriétés mécaniques et durabilité, et sa versatilité permet la fabrication d'objets ou d'emballages rigides ou flexibles. Le polystyrène (PS) peut quant à lui être utilisé sous forme rigide, lorsque la transparence est importante, ou expansée pour ses propriétés isolantes [5]. Les familles de polymères communément utilisés par l'industrie de l'emballage sont répertoriées au tableau 1.1.

Les polymères sont mélangés avec d'autres substances (additifs) afin de générer des plastiques avec les propriétés souhaitées. Par exemple, des charges minérales ou des fibres servent à renforcer la structure. Des molécules halogénées ou phosphorées peuvent être utilisées comme retardateurs de flamme. Certains composés plastifiants augmentent la malléabilité du plastique, et des composés compatibilisants favorisent l'homogénéisation lorsque plusieurs polymères sont mélangés ensemble. Enfin, des composés antioxydants et des stabilisants sont également employés pour augmenter la durabilité du produit [5].

Tableau 1.1 : Classification des plastiques par famille de polymère.

	PET	HDPE	PVC	LDPE	PP	PS	Autres
Nom	<i>Polyéthylène téréphtalate</i>	<i>Polyéthylène haute densité</i>	<i>Polyvinyle chloré</i>	<i>Polyéthylène basse densité</i>	<i>Poly-propylène</i>	<i>Poly-styrène</i>	<i>Plusieurs types</i>
Code	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7
Collecte sélective^a	Accepté	Accepté	Accepté	Accepté	Accepté	Non-accepté ^b	Accepté
Prix de vente^c	260	514	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

^a Selon la charte de matières recyclables publiée par Recyc-Québec.

^b En général. Le polystyrène est accepté dans la MRC d'Arthabaska, où a eu lieu cette étude.

^c Selon l'indice du prix des matières d'août 2016 pour les plastiques rigides (Recyc-Québec). Les montants sont en dollars canadiens par tonne métrique.

1.2 Récupération du plastique

Il est estimé que 320 700 tonnes métriques de plastique sont annuellement récupérées au Canada et vendues afin d'être recyclées, selon les données les plus récentes [6]. Les plastiques récupérés proviennent de programmes de collecte porte-à-porte visant les résidences, les petits commerces, les institutions, ou de conteneurs en provenance des gros commerces, des industries et du secteur de la construction. En fin de vie, ces différents plastiques sont combinés en un flux de matière fortement hétérogène aux propriétés variées. À des fins statistiques, ce flux de plastique est souvent caractérisé soit en fonction des familles de polymères qui s'y retrouvent, soit par type d'emballage (ex : bouteille, films et pellicules, contenants rigides ou expansés), ou une combinaison des deux [7]. Ceci s'explique par le fait qu'il s'agit de caractéristiques d'intérêt pour les recycleurs potentiels, pour des raisons qui seront expliquées en détail à la section 1.3.

Les plastiques sont par la suite acheminés vers des centres de tri, où ils sont triés puis pressés en ballots pour être mis en marché par l'entremise de courtiers, ou être vendus directement à des conditionneurs et recycleurs. Environ 97% des plastiques récupérés par les centres de tri au Canada correspondent à quatre catégories, soit les bouteilles de PET (113 100 TM), les bouteilles de HDPE (69 000 TM), les films et pellicules composés en majorité de PE ou de plastiques multi-laminés (61 800 TM) et les contenants rigides (66 700 TM) [6]. Cette dernière catégorie rassemble plusieurs types de polymères (Figure 1.2).

Les contenants rigides doivent être séparés par famille de polymère avant le recyclage, ce qui génère plusieurs filières de faible volume, à la rentabilité fragile. En général, les centres de tri investissent surtout dans les procédés permettant de récupérer des polymères présents en grand volume (PET et HDPE). Les autres plastiques rigides sont plutôt vendus en ballots mélangés à des recycleurs spécialisés, et environ 45% de ces ballots seront exportés (Figure 3). Le coût du tri des contenants en plastique est estimé à plus de 300\$ par tonne au Québec [8], ce qui bien au-dessus de la valeur de revente moyenne des plastiques triés [9]. Il s'agit donc d'une filière qui demeure très peu exploitée, et les centres de tri s'en départissent au meilleur offrant faute d'incitatifs pour rehausser sa valeur.

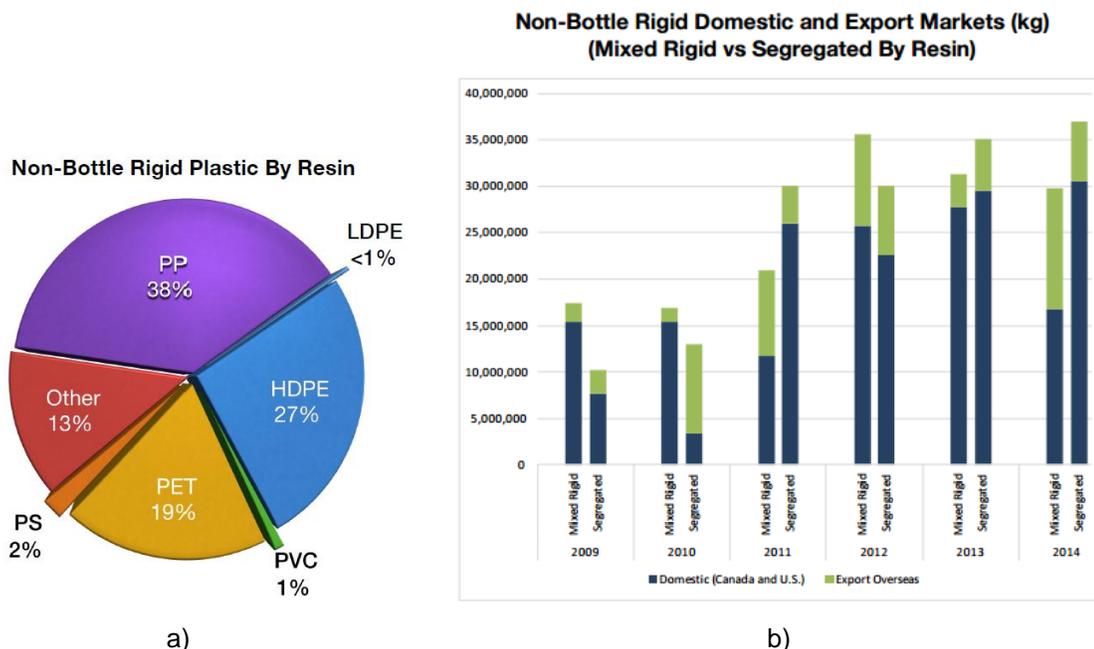


Figure 1.2: a) Composition moyenne en polymère des contenants rigides au Canada. b) Quantités globales de contenants rigides exportés et triés par polymère. Source : [6]

La quantité de plastique générée par les ménages québécois en 2012 a été estimée à 240 588 tonnes, soit environ 8,1% du poids total des matières résiduelles [7]. De cette quantité, on estime que seulement 41 000 tonnes métriques (TM) ont été vendues par les centres de tri pour le recyclage [10], ce qui représenterait environ 16% du total. De cette quantité, 9000 TM ont été vendues en ballots mélangés, dont environ 35% (un peu plus de 3000 TM) destinées vers des courtiers ou directement exportées [11]. Le reste peut trouver preneur parmi les fabricants de mobilier urbain, de madriers de plastique, de palettes ou d'autres éléments non structuraux. Ils sont également achetés par des conditionneurs/recycleurs spécialisés pour terminer le procédé de tri, de lavage et de granulation ou de transformation en produit fini.

Les deux études citées précédemment sont basées sur des données de sondages complétés de façon volontaire par les centres de tri. Les valeurs rapportées sont approximatives et possiblement trompeuses. Par exemple, une étude de caractérisation des matières placées dans le bac de recyclage par les ménages Québécois estime plutôt à 75 840 TM le flux de plastiques acheminés vers les centre de tri, soit 85% de plus que les données de ventes [7]. L'étude de Moore's Associates tente de palier aux carences entre les sondages et bilans de masse en sondant aussi des conditionneurs, recycleurs et autres acteurs Nord-Américains de la chaîne de valeur afin de capter le maximum de

transactions de plastiques en ballots. Il est cependant difficile de connaître réellement les quantités de plastiques vendus en ballot mélangés, ni la proportion qui est exportée. Par conséquent, les données de caractérisation, par exemple la composition en polymères, associées aux plastiques et contenants rigides mélangés doivent aussi être utilisées avec prudence. Enfin, la performance des filières de recyclage des plastiques est très difficile à évaluer par manque de données précises. En effet, une certaine quantité de la matière acheminée chez les recycleurs est jugée indésirable et jetée. Le taux réel de recyclage du plastique est donc inconnu, mais probablement très bas.

Les industries locales éprouvent de sérieuses difficultés à rentabiliser leurs opérations avec les plastiques #3 à #7, et attribuent une partie du problème à la faible qualité de la matière reçue des centres de tri [12]. Avec la fermeture graduelle d'un pan majeur des marchés d'exportation, suite à l'imposition de la «Green Fence» en Chine, une politique nationale visant à rehausser la qualité des importations de matières dans ce pays, il devient impératif pour les centres de tri de s'intéresser davantage à la qualité de leurs plastiques mélangés afin de mieux répondre aux exigences des marchés locaux, et ainsi promouvoir l'économie circulaire [13].

1.3 Les plastiques émergents

Les plastiques dits «émergents» sont des produits récents, générés en faible volume et pour lesquels aucun débouché de recyclage n'existe présentement [14]. Leur présence et leur croissance sur le territoire québécois est mal connue, mais pourrait influencer la composition globale, et la valeur marchande, des flux de plastiques récupérés [14]. Les emballages noirs de PET, le PET-glycol, le polylactide (PLA), les plastiques dits «dégradables» et les plastiques multi-laminés (métallisés ou multi-matières) ont tous été ciblés comme étant des plastiques émergents, et représenteraient un gisement supérieur à 900 tonnes au Québec [7]. Par leur hétérogénéité, les plastiques émergents ne forment pas un flux distinct. Afin de définir cette catégorie, l'emphase a été placée sur le caractère potentiellement nuisible de ces plastiques sur la qualité globale des matières dans lesquelles ils pourraient se retrouver en tant que contaminants. Les technologies à l'œuvre dans les centres de tri, dans la plupart des cas, ne permettent pas de bien les isoler. Les plastiques mixtes posent déjà d'importants défis de rentabilité suite à la difficulté de séparer tous les polymères et la présence additionnelle de contaminants émergents contribue à faire diminuer la demande et affaiblit l'industrie de la récupération et du tri.

1.4 Plastiques et économie circulaire

Les plastiques de consommation courante ont été fortement associés à un modèle économique linéaire qui consiste à extraire des ressources naturelles, les transformer, les utiliser et les éliminer par enfouissement, incinération ou abandon [3]. À l'échelle de la planète, on estime que seulement 14% des emballages de plastique sont récupérés pour fins de recyclage [3]. Récemment, les impacts environnementaux qui découlent de cette réalité suscitent de plus en plus l'indignation. On estime que jusqu'à 10% de la production globale de plastique se retrouve éventuellement dans les océans, et que ce flux dépassera en importance la masse combinée de tous les poissons marins d'ici 2050 [15].

La réduction à la source constitue la première étape incontournable de toute stratégie d'économie circulaire, puisque celle-ci favorise à la fois la préservation de ressources naturelles limitées, et une réduction des matières en fin de vie à gérer. Cette stratégie est applicable dans le cas des plastiques de consommation courante, et contribue à diminuer leur impact environnemental. Le bannissement des sacs d'emplette à utilisation unique en est l'exemple. Cependant, les emballages de plastique, qui sont légers et imperméables jouent un rôle très important dans les chaînes d'approvisionnement actuelles, entre autres en facilitant le transport et la préservation de biens, particulièrement des aliments.

Le recyclage des produits d'utilisation courante constitue aussi un volet incontournable de toute stratégie d'économie circulaire, qui vise à allonger le plus possible le cycle de vie de la matière et de son énergie potentielle. En considérant la faible durée de vie moyenne des objets de plastique, et leur potentiel impact environnemental à l'élimination, le recyclage est donc un aspect de la gestion intégrée des plastiques qui doit être favorisé lorsque l'utilisation du plastique s'avère essentielle.

Le recyclage du plastique est un procédé qui se déroule en plusieurs étapes et implique plusieurs industries (Figures 1.3 et 1.4):

1. Les plastiques récupérés sont acheminés vers un centre de tri ou de transbordement.
2. Les plastiques sont séparés en quelques fractions au centre de tri puis mis en ballots. Le tri peut être effectuée manuellement ou à l'aide de séparateurs optiques à infrarouge proche (NIR).

3. Les conditionneurs lavent le plastique granulé dans des bassins d'eau. La flottation permet aussi de séparer certains contaminants par densité. Les flocons triés sont lavés, séchés et souvent extrudés pour en faire des granulés de densité suffisante pour justifier leur transport sur de longues distances.
4. (Non-inclus dans la Figure 1.4) Les granulés de plastique sont transformés par un manufacturier pour la production de produits finis.

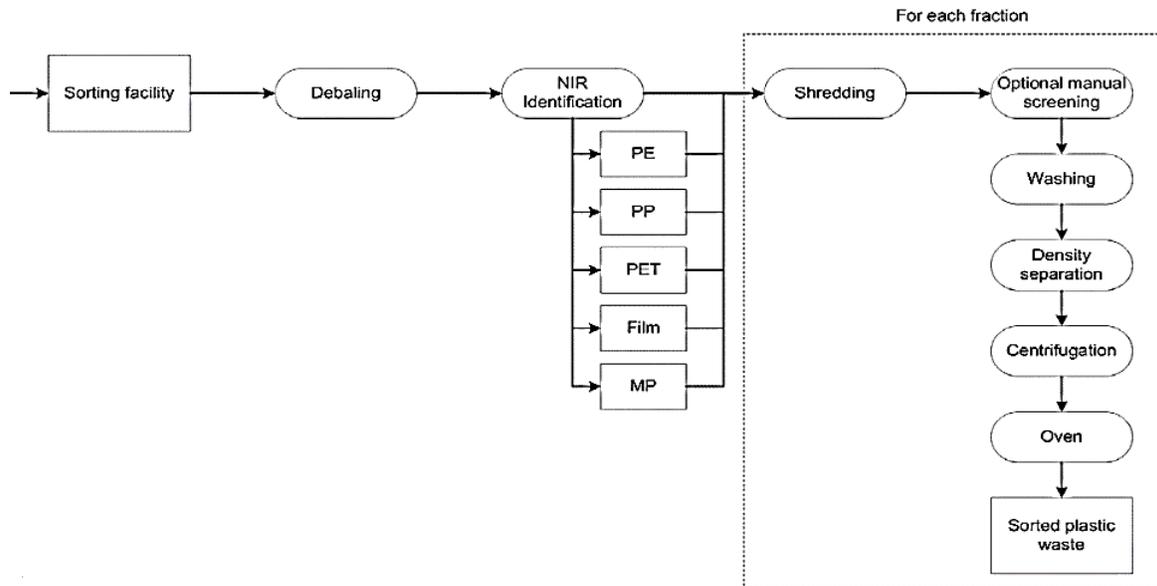


Figure 1.3: Étapes de tri et conditionnement du plastique post-consommation. Source : [16]

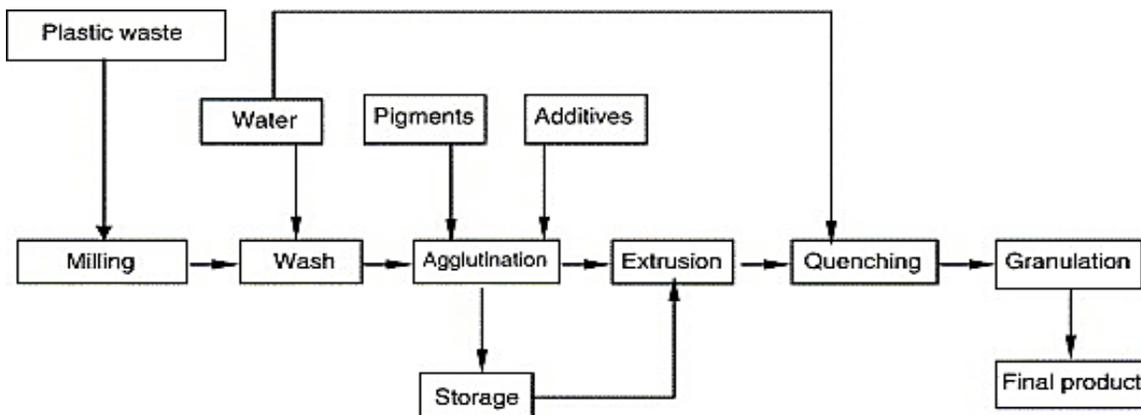


Figure 1.4 : Procédé de recyclage thermomécanique du plastique. Source : [17]

Les technologies employées par les centres de tri visent à optimiser la séparation de tous les plastiques en fonction de leur contenu en polymère, car il est établi que la séparation des différents polymères est une étape cruciale du recyclage [18], pour des raisons expliquées à la section 1.5. De nombreuses technologies de tri mécanisé permettent un tri des plastiques en fonction du type de polymère [19]. La technologie employée le plus fréquemment dans les centres de tri est le séparateur optique à proche infrarouge, ou near-infrared (NIR). Cet appareil capte la lumière réfléchie par l'objet défilant sur un convoyeur et détecte les bandes d'absorption situées entre 1000 et 2000 nm. Chaque bande d'absorption correspond à une liaison chimique spécifique, et les familles de polymère peuvent être reconnues par une combinaison unique de pics d'absorption de différentes intensités. Un algorithme d'identification intégré à l'appareil est utilisé pour assigner les familles de polymère aux spectres enregistrés (Figure 1.3). Cette technologie de tri est particulièrement avancée puisque les taux de séparation et de pureté du tri des plastiques atteignent 95%, tout en assurant un débit rapide de la matière (selon les données du fabricant). Cependant, cette technique analyse la lumière réfléchie par la matière, donc elle n'analyse pas les plastiques noirs ou foncés. De même, l'efficacité du tri est affectée par la présence d'emballages composés de plusieurs polymères et de plastiques empilés, emboîtés ou mal répartis sur le convoyeur. Aussi, certains grades de plastique ayant une forte concentration d'additifs, ou ayant subi une dégradation moléculaire auront une signature infrarouge altérée et pourraient ne pas être reconnus par le lecteur optique. Enfin, le séparateur optique ne permet d'isoler qu'un ou deux types de matière (tri à 2 ou 3 voies).

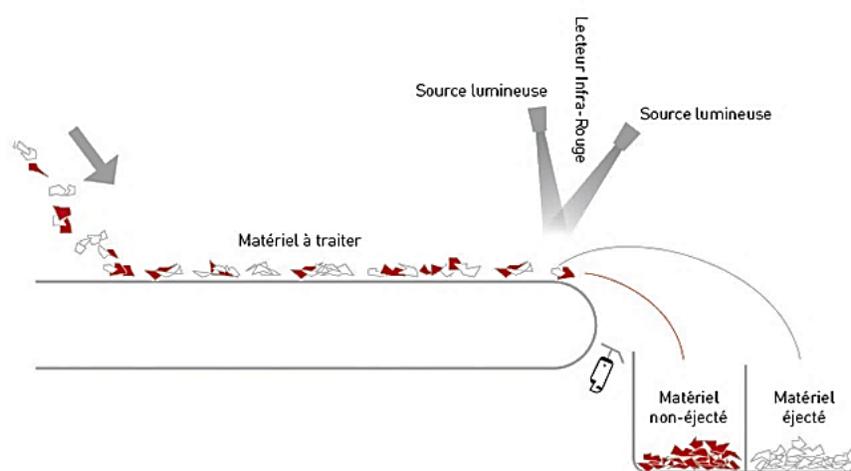


Figure 1.5 : Fonctionnement d'une unité de tri optique NIR. Source : [20]

Les plastiques ne peuvent pas être recyclés en boucle fermée indéfiniment car la contamination de la matière et la dégradation chimique des polymères sont inévitables durant leur vie utile et leur transformation [21]. L'ajout d'additifs, de résine vierge ou d'autres résines recyclées permet de compenser les pertes de performances résultant de cette dégradation. Les étapes de récupération, tri et conditionnement de la matière sont toutes déterminantes pour l'obtention d'un produit recyclé libre de contaminants, bien que ces étapes s'avèrent coûteuses sur le plan environnemental et énergétique. La pertinence du recyclage par rapport à d'autres scénarios de valorisation peut être évaluée par bilan énergétique [22]. Par exemple, si l'énergie nécessaire au recyclage est plus élevée que celle nécessaire pour l'extraction de matières premières, d'autres solutions doivent être envisagées pour la gestion de la matière en fin de vie.

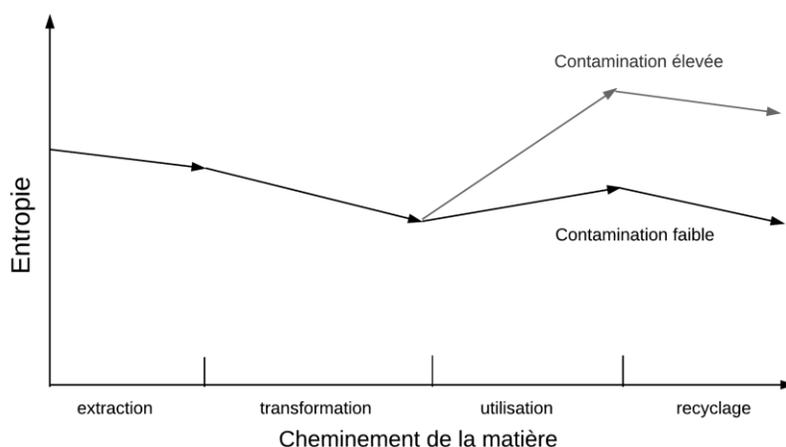


Figure 1.6: Gain entropique et recyclage. Adapté de [22]

La dégradation progressive du plastique l'entraîne vers des domaines d'application de moins en moins contraignants, nécessitant une mise en œuvre progressivement moins complexe. Le phénomène est connu sous le nom de «recyclage en cascade» [23]. À chaque palier de cette cascade, un gain d'entropie est réalisé car le plastique est mélangé avec d'autres substances, rendant un retour vers son application antérieure difficile ou impossible. Cependant, cette stratégie est souhaitable si la dépense énergétique nécessaire pour le recyclage en boucle fermée est plus grande que le gain d'entropie lorsqu'on achemine la matière à un palier inférieur.

Afin d'allonger la vie utile du polymère, la cascade doit idéalement comprendre plusieurs paliers, les applications de longue durée se trouvant à la fin. À chaque palier, il est aussi

souhaitable de minimiser le gain d'entropie généré par l'ajout d'autres matières ou la dégradation.

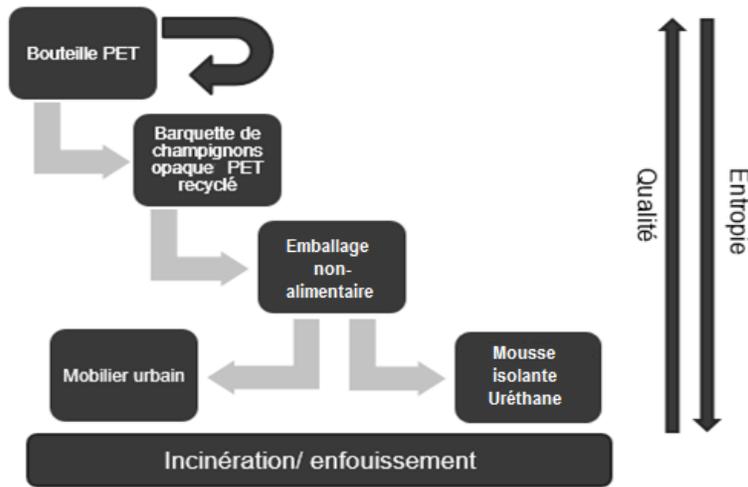


Figure 1.7 : Illustration du concept de recyclage en cascade pour le PET.

Les applications de génie civil se retrouvent généralement au bas de la cascade. Ces applications ont en général une longue durée de vie relativement aux emballages, et ralentissent les flux de plastiques à enfouir lorsque ceux-ci ne sont plus valorisables autrement. Certaines propriétés du plastique d'emballage (apparence, résistance à l'impact) deviennent moins pertinentes alors que s'ajoutent d'autres considérations : dimensionnement, propriété du composite, durabilité, etc.

Les composites cimentaires incorporant des agrégats de plastique recyclé sont un exemple de valorisation du plastique en application de génie civil. Ces matériaux composites présentent un avantage par rapport aux autres applications issues du recyclage thermomécanique : on élimine le besoin d'extruder le plastique. Non seulement le conditionnement préalable du plastique devient moins complexe et énergivore, le problème d'incompatibilité des plastiques à l'état fondu (dû aux différents points de fusion des polymères) est éliminé. Ainsi, plusieurs types de plastique peuvent être valorisés ensemble. Vu sous un autre angle, ces matériaux ont une entropie initiale plus élevée que d'autres applications de plastique recyclé, ce qui favorise cette option de recyclage du point de vue du bilan énergétique. Les étapes de recyclage du plastique deviennent :

1. Les plastiques récupérés sont acheminés vers un centre de tri ou de transbordement.

2. Les plastiques sont séparés en quelques fractions au centre de tri (afin de retirer les pastiques à valeur élevée) puis mis en ballots. Le tri peut être effectuée manuellement ou à l'aide de séparateurs optiques à infrarouge proche (NIR).
3. Le plastique est granulé à une taille voulue et utilisé en tant qu'agrégat dans le béton.

Certaines tendances peuvent être dégagées d'études de revue des essais effectués sur du béton et du mortier incorporant des agrégats de plastique comme substitut au sable, et seront détaillées au chapitre 3. En général, on observe une perte de résistance mécanique (compression, flexion, élasticité) corrélée linéairement à la proportion de plastique utilisé dans le mélange. Cependant, les résultats d'analyses de durabilité (perméabilité, fissuration, résistance à l'abrasion et au gel/dégel, ductilité) et d'autres analyses (conductivité thermique) favorisent le béton avec agrégats de plastique par rapport au béton standard. Du béton léger fait de billes de polystyrène vierge est présentement utilisé en construction pour sa faible masse volumique et son caractère isolant. C'est un matériau de choix pour la réfection de structures, par exemple, où l'ajout de nouveaux matériaux doit être limité pour éviter un surplus de charge.

1.5 Concepts de qualité des plastiques récupérés

Une analyse de portée globale, «The New Plastics Economy», a récemment conclu qu'une approche intégrée et planifiée de gestion de plastiques permettrait de soutenir une industrie du recyclage économiquement viable pour plus de 50% de tous les plastiques de consommation courante [3]. En effet, des modifications ciblées dans la conception des emballages, une normalisation des systèmes de récupération et de traitement des plastiques ainsi qu'une augmentation de produits recyclés de haute qualité hausseraient la valeur moyenne des plastiques récupérés de 190-250 \$US par tonne. Cette augmentation permettrait de rentabiliser les procédés de tri et de conditionnement nécessaires au recyclage. En retour, les bénéfices environnementaux associés au recyclage sont nombreux. Réintroduire du matériel déjà transformé dans la chaîne d'approvisionnement des manufacturiers d'emballages entraîne une diminution de la demande en hydrocarbures comme matière première et des émissions de GES. De plus, une industrie du recyclage profitable sert de levier pour l'implémentation de systèmes de collecte plus efficaces pour limiter le rejet des plastiques dans l'environnement [3].

La valeur accrue des ballots de plastique récupérés viendrait du fait que ceux-ci seraient plus facilement recyclables, donc de meilleure qualité. La *qualité* des flux de plastique postconsommation est définie par un ensemble de propriétés facilitant la récupération, la séparation et l'introduction de plastiques en fin de vie dans de nouveaux procédés industriels [21, 24, 25]. L'analyse de certains paramètres visant à évaluer la qualité des plastiques en fin de vie a aussi été désignée par certains auteurs : *caractérisation orientée vers le recyclage* [26]. Ces paramètres peuvent être mesurés à toutes les étapes du cycle de vie des plastiques, de la conception du produit initial jusqu'aux propriétés du produit recyclé, en passant par les différentes étapes d'utilisation, de tri et de conditionnement de la matière.

1.5.1 Règles d'écoconception

Les fabricants d'emballages de plastique peuvent se fier à des recommandations d'écoconception afin de réduire les quantités de matière et d'énergie nécessaires à la fabrication d'un produit, à en prolonger la vie utile (durabilité) et, pertinemment, à en faciliter le recyclage. Elles sont applicables à l'échelle d'un produit d'emballage particulier, avant sa mise en production, et visent ses différentes composantes. Par exemple, l'«association of plastic recyclers» (APR) conseille d'utiliser des composantes qui sont faites d'un même polymère, ou qui peuvent être facilement séparées par flottaison dans une ligne de lavage, comme dans le cas d'une étiquette de PET (densité = 1.35) sur une bouteille de HDPE (densité = 0.95). Les étiquettes de papier, à l'inverse, sont déconseillées. Pour les mêmes raisons, l'utilisation d'additifs ou de colorants qui modifient substantiellement la densité de la résine vierge est découragée. Ces recommandations sont cependant de caractère non-obligatoire [27].

Un consortium d'experts et d'organismes agréés de gestion d'équipements électriques et électroniques, nommé «eco3e», a élaboré un guide visant à favoriser l'écoconception de ces produits, notamment pour faciliter leur gestion en fin de vie. Certaines de ces directives sont légalement obligatoires. Ainsi, les manufacturiers et recycleurs sont mis au fait des règlements européens en vigueur, ainsi que d'autres paramètres pertinents pour le recyclage de différents produits. Pour le plastique, le guide Éco-conception d'eco3e émet des recommandations portant sur 4 points [28]:

- Choisir des plastiques en fonction du potentiel de recyclabilité du polymère et des additifs présents.

- Choisir des plastiques compatibles entre eux à l'état fondu, lorsque plusieurs plastiques sont combinés pour la conception d'une pièce.
- Prévoir les opérations de tri nécessaires pour le recyclage d'un équipement, et le concevoir de façon à les faciliter (ex : s'assurer d'un bon écart de densité entre les plastiques pour la séparation par densité; minimiser l'éventail de pigments et de charges).
- Adapter son produit pour prendre en compte certaines limites aux procédés de recyclage (ex : éliminer la présence de métal surmoulé).

<u>Echelle de recyclabilité des matériaux plastiques.</u>		
Couramment recyclés	Recyclés	Peu ou pas recyclés
PP, PEhd, PET, PVC rigide,ABS, HIPS, PC+ABS	PA6, PA66, PBT, PC, PVC Souple	POM, BMC, SMC, EPOXY, PBT, complexe PVC avec un taux <50%en PVC, alliages, PUR, PLA, PBT, EVA, PTFE, bakelite
<u>Les charges et additifs pouvant avoir des effets négatifs sur le recyclage</u>		
Est bien toléré pour le recyclage *	Est peu toléré pour le recyclage	N'est pas toléré pour le recyclage
Talc, Carbonate de Calcium, TiO2	Petites concentrations en fibres de verre (<5%)	Retardateurs de flamme, grosses concentrations en fibres de verre (>10%), fibres végétales, nanoparticules**, pigments à base de métaux lourds
* Les cahresg peuvent avoir un effet négatif sur le tri des plastiques (changement de densité) donc il est recommandé de limiter leur usage		
**non tolérés pour des raisons sanitaires et réglementaire (RoHS, Reach)		

Figure 1.8: Recommandations du guide Eco-conception d'eco3e pour la qualité des flux de plastiques de produits électroniques et électriques. Source : [28]

Les changements proposés par le rapport «The New Plastics Economy» dans la conception des emballages visent à réduire les pertes de matériel lors du tri et du conditionnement des plastiques, et la contamination du flux de matière par des impuretés. Par exemple, afin de minimiser les interférences lors de la détection des polymères par les unités de tri optique, on suggère d'éliminer les différentes composantes des emballages comme les bouchons, étiquettes, fermetures hermétiques, encres et autres. La sélection judicieuse et minimalisée d'additifs est également suggérée, afin de préserver au maximum l'intégrité du polymère de base. Certains additifs peuvent convenir à une

application donnée mais devenir nuisibles lorsque le plastique est recyclé vers un autre usage. De plus, les additifs peuvent modifier la densité des plastiques, ce qui diminuerait l'efficacité de la séparation des polymères dans les cuves de lavage. Enfin, il est suggéré de ne plus recourir à certains polymères utilisés à faible volume et qui ne peuvent pas bénéficier d'économie d'échelle à leur fin de vie. Cette mesure vise principalement le PS et le PVC mais s'adresse à tous les plastiques émergents [3].

1.5.2 Contrôle qualité au centre de tri

Les centres de tri effectuent un contrôle qualité de leurs ballots par inspection visuelle. Plusieurs organismes ont émis des lignes directrices sur le contenu et la taille des ballots voués au recyclage, dont l'Institute of Scrap Recycling Industries (ISRI) et l'APR [29, 30]. En général, les normes de l'ISRI exigent des taux de contamination (i.e. la présence de matériel indésirable ou non-spécifié) inférieurs à 2% de la masse du ballot et les matières comme le verre, les métaux et le matériel électronique sont proscrites (Tableau 1.2).

Tableau 1.2: Lignes directrices de l'ISRI sur la qualité des ballots de plastiques vendus par les centres de tri.

Grade ISRI	Matières acceptées	Seuil de contamination	Matières prohibées
«Mixed unsorted #1-7 bottles and containers»	Tous les emballages de plastique post-consommation, moins les gros articles	<2% total : gros items (chaudières, paniers, meubles), matériaux autres que thermoplastiques	Métaux, verre et matières dangereuses
«Mixed sorted #3-#7 bottles and containers»	Tous les emballages de plastique post-consommation, moins les gros articles, le PET et le HDPE	<2% total : gros items (chaudières, paniers, meubles), matériaux autres que thermoplastiques	Métaux, verre et matières dangereuses
«Tubs and Lids»	Contenants #2, #4 et #5 en provenance d'une collecte sélective des matières recyclables	<10% total : PET, PVC, PS, Chaudières HDPE, #7 Autres, Papier, Liquides	Métaux, verre, sacs et pellicules plastiques, déchets électroniques, bois, matières dangereuses

Certains appareils de tri optique couramment utilisés par les centres de tri permettent d'évaluer, en temps réel, la composition du flux de matière sur les convoyeurs à l'aide de logiciels d'acquisition de données reliés au spectromètre infrarouge de l'appareil. Cependant, ces données sont réservées pour utilisation à l'interne et ne sont pas communiquées aux autres joueurs impliqués dans le recyclage des plastiques.

1.5.3 Évaluation de la qualité du produit recyclé

Chez les recycleurs, l'évaluation de la qualité est plus avancée puisqu'elle dépend surtout des propriétés physico-chimiques du plastique récupéré, qui devient alors un intrant dans un procédé industriel manufacturier. Les auteurs Vilaplana et Karlsson ont suggéré que la qualité des plastiques voués au recyclage reposait sur trois aspects distincts : la composition en polymères, l'intégrité chimique des polymères et la présence de matières indésirables (contaminants) [21].

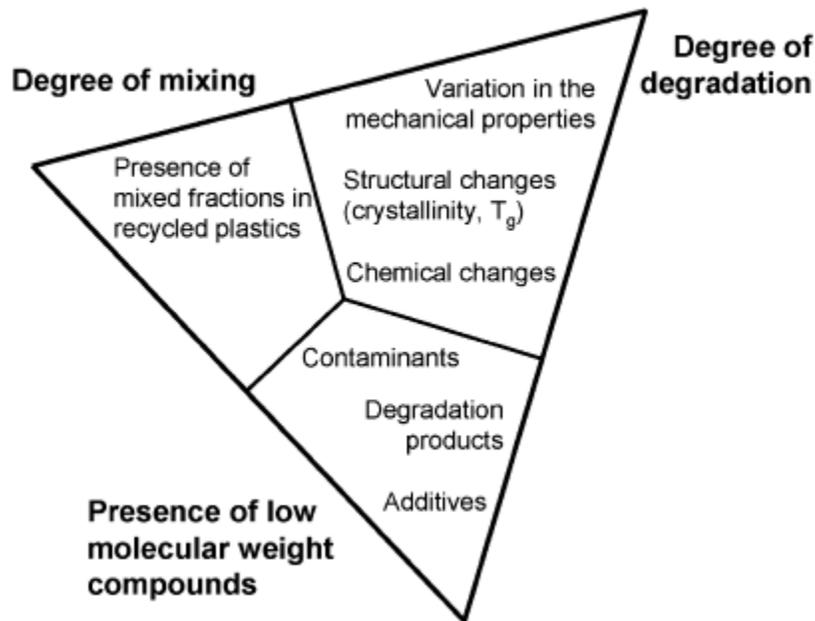


Figure 1.9 : Paramètres pour évaluer la qualité des produits recyclés, répartis en trois aspects distincts. Source : [31]

Lorsque différents polymères sont présents dans un flux de matière, puis fondus ensemble, les molécules d'une même famille s'agglomèrent à l'état liquide. Ceci produit une émulsion de plusieurs phases distinctes. L'interface entre ces phases forme des points faibles dans le produit fini, et les propriétés mécaniques sont affectées. En général, les procédés de tri et de décontamination tentent de séparer autant que possible les différents polymères pour éviter ce problème. Une étude portant sur un flux de PP post-consommation a démontré que le contenu réel en PP variait entre 93 et 98% après purification par tri optique et par densité [16]. Ces auteurs ont utilisé différentes techniques analytiques afin de déterminer la composition réelle d'un flux mélangé de polyoléfines (PP

et PE). Plusieurs échantillons de matériel séparé au préalable par tri optique ont été caractérisés par inspection visuelle, et le taux de contamination estimé du PE par le PP variait entre 2 et 10%. Par la suite, des échantillons lavés et homogénéisés du même flux ont été caractérisés par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) et par calorimétrie différentielle à balayage (DSC). Ces techniques analytiques basées sur les propriétés physiques de la matière ont révélé des taux de contamination du PE par le PP qui variaient entre 4-14% et 6-18%, respectivement. Les auteurs ont suggéré que ces disparités s'expliquaient par le fait que le contenu en PP est généralement sous-estimé lors du tri optique ou manuel car ces méthodes ne tiennent pas compte des différentes parties d'un emballage multi-matières (ex : bouteille HDPE avec bouchon PP).

Les polymères subissent des attaques en présence de facteurs environnementaux comme l'humidité, la température, les rayons UV ou l'oxygène qui altèrent leur intégrité chimique [32]. Ces attaques génèrent de nouvelles liaisons chimiques ou créent des points de rupture dans la molécule, ce qui diminue la masse molaire moyenne. De plus, le recyclage thermomécanique est effectué sous des conditions de stress thermique et mécanique qui facilitent ces attaques, donc la matière recyclée plusieurs fois peut avoir subi une dégradation à divers degrés. En retour, certains paramètres du produit fini comme la cristallinité, la densité et les propriétés mécaniques sont affectées [21]. La chromatographie d'exclusion stérique permet de mesurer directement la masse molaire d'un échantillon de plastique à condition que celui-ci puisse être solubilisé au préalable. La spectroscopie FTIR peut, quant à elle, révéler la présence de groupements fonctionnels oxydés qui sont des indicateurs de dégradation moléculaire. Les auteurs Hu *et al.* [26] ont procédé à une caractérisation de la densité et de la viscosité d'échantillons de polyoléfines en provenance de la Roumanie. Deux systèmes de classification ont été utilisés pour trier les plastiques : par famille (LDPE, HDPE, PP et autres) et par méthode de fabrication (soufflé ou moulé par injection). La densité du PP moulé par soufflage variait entre 0,88 et 0,97 g/cm³, alors que celle du PP moulé par injection variait entre 0,88 et plus de 1,00 g/cm³. La viscosité variait entre 1000 et 6000 Pa·s pour le PP moulé par injection, et entre 7000 à 8000 Pa·s pour le PP moulé par soufflage (mesuré entre 125 et 145°C par un viscosimètre à plaques). Cette étude a démontré que des variations significatives existaient d'un échantillon à l'autre en fonction de propriétés physiques qui sont étroitement liées à la masse molaire et à la structure des macromolécules, et peuvent servir d'indicateurs de dégradation moléculaire. Aussi, les auteurs ont démontré que ces paramètres physiques variaient non seulement d'un polymère à l'autre mais aussi en

fonction du procédé de fabrication. Ceci s'explique par le fait que plusieurs grades existent au sein de chaque famille de polymère et leurs propriétés sont ajustées en fonction de l'application visée.

Dans un plastique voué au recyclage, toute matière autre que le polymère de base peut être considérée comme étant indésirable. La surface des plastiques post-consommation est souvent « souillée » par des étiquettes, des adhésifs, de l'encre ou des liquides, qui peuvent être retirés en partie par un procédé de lavage chez un recycleur. Cependant, les pigments, antioxydants, matériel de renforcement (fibres, charges) et autres additifs qui sont intégrés au plastique ne peuvent pas être séparés, donc ils augmentent l'hétérogénéité et abaissent la qualité du matériel. Certains métaux ou molécules issus du procédé de polymérisation forment des sites réactifs qui favorisent les réactions de dégradation des polymères [25], tandis que les matériaux de renforcement modifient la viscosité et les propriétés mécaniques de la matière. Il faut également noter que le dosage différencié de certains additifs permet de générer plusieurs grades aux propriétés différentes au sein d'une même famille de polymère. Par exemple, du PP conçu pour faire des emballages moulés par soufflage (bouteilles) est plus visqueux en fusion que du PP pour emballages moulés par injection, en raison du procédé de manufacture utilisé [26]. Vilaplana *et al.* [31] ont analysé des échantillons de PS à impact élevé (HIPS), prélevés à différentes étapes de la transformation chez un recycleur (à la réception, après le lavage et après l'extrusion). Leur décomposition thermique a été étudiée par analyse thermogravimétrique (TGA). L'importance relative des contaminants inorganiques variait grandement, soit entre 1,5% et 3,5% de la masse totale. Ces résultats suggèrent que des variations significatives existent dans la contamination moléculaire de certaines filières de plastique. Il est intéressant de noter que le site de prélèvement des échantillons sur la ligne de recyclage n'a pas semblé influencer les résultats de cette étude.

Dans certains cas, la présence de monomères résiduels (ex : BPA dans le polycarbonate), ou d'additifs peut causer des problèmes de toxicité chez les humains. En Suisse, un recensement des substances dangereuses contrôlées par la loi et présentes dans les plastiques de déchets électroniques et d'appareils électroménagers récupérés a été effectué [33]. Des échantillons ont été analysés par spectrométrie atomique pour la présence de métaux lourds, et par spectrométrie de masse et chromatographie en phase gazeuse pour la présence de retardateurs de flammes bromés, chlorés ou phosphatés. Des concentrations importantes de plomb et de chrome ont été recensées dans toutes les

catégories de plastiques mélangés, en particulier les jouets, outils et équipements de sport. Cette étude a permis de démontrer l'importance d'un contrôle et de la traçabilité du contenu de certains plastiques voués au recyclage.

La norme technique ASTM D5577 «Standard Guide for Techniques to Separate and Identify Contaminants in Recycled Plastics» a été développée comme catalogue de tests standardisés pertinents lors du contrôle de la qualité des produits de plastiques recyclés [34]. Les paramètres analysés par ces tests sont listés au tableau 1.3. Bien qu'elles n'aient pas été regroupés en grappes d'analyse, ces normes cadrent toutes dans l'un des trois axes d'analyse de la qualité suggérés par Vilaplana et Karlsson [21].

Tableau 1.3. Méthodes standard ASTM servant à analyser la qualité des produits en plastique recyclé.

Analyse	Paramètre mesuré	Méthodes ASTM
Humidité	% eau	Thermogravimétrie ASTM D1457
Fluidité	Indice de fluidité (Melt index)	ASTM D1238
Densité	Densité (contamination par d'autres polymères)	ASTM D792
Contamination inorganique	% cendres (carbone, talc, fibres naturelles et artificielles)	En cours de développement
Analyse thermique	Transitions de phase (T_g et T_m) % cristallinité (présence d'un mélange de polymères)	ASTM D3418 et ASTM E794
Analyse infrarouge	Présence qualitative de contaminants organiques	ASTM E1252
Chromatographie	Poids moléculaire	ASTM E355 (gaz) et ASTM E682 (liquide)
Séparation par densité	Densité	ASTM D5577
Contamination par le chlore	Test de la flamme verte	ASTM D5577
Extraction avec solvants	Présence de contaminants solubles (polymères, colles et autres)	ASTM D5577

Les propriétés d'intérêt ciblées jusqu'à maintenant pour le recyclage thermomécanique ne sont pas les mêmes que celles qui ont été mesurées sur les agrégats de plastique pour béton lors d'études précédentes [35]. Il est probable que certains paramètres de qualité perdent de leur pertinence lorsque le plastique n'est pas fondu au préalable, comme le point de fusion ou la viscosité. Tel que mentionné précédemment, les problèmes de

compatibilité entre différents polymères ne posent pas obstacle à la production d'agrégats pour le béton. Plutôt, ce sont les propriétés physiques généralement analysées chez les agrégats minéraux (gravier, sable) qui ont servi de base d'analyse pour étudier le béton avec agrégats de plastique sont: la densité, le module élastique, la granulométrie, les propriétés de surface et la résistance aux attaques chimiques. Ces propriétés doivent essentiellement être caractérisées lors du dosage et de la mise en place du béton [36]. Le tableau 1.4 permet une comparaison entre les paramètres de qualité du recyclage conventionnel et de la production d'agrégats de plastique.

Tableau 1.4: Quelques propriétés d'intérêt pour le recyclage thermomécanique vs. le recyclage en agrégats légers.

Recyclage thermomécanique	Recyclage en agrégats légers [35]
Viscosité	Module élastique
Points de fusion et de transition vitreuse	Conductivité thermique
Présence d'autres polymères	Densité apparente du grain
Résistance à la traction	Taille et forme des particules
Poids moléculaire	Résistance aux attaques chimiques
Résistance à l'impact	

En résumé, les outils de mesure et de contrôle de la qualité des plastiques varient considérablement parmi les acteurs de la chaîne des valeurs. Une approche intégrée doit prendre en considération que la qualité des plastiques peut être sévèrement compromise à toutes les étapes de leur cycle de vie : la formulation, la conception de l'emballage, l'utilisation, l'efficacité de leur séparation (au centre de tri) et de leur conditionnement (avant recyclage). Un recours à des méthodes avancées de caractérisation est nécessaire afin de dresser un portrait exhaustif des propriétés des plastiques et de leurs fluctuations. En recueillant une partie de ces données au centre de tri, le générateur de matières premières de l'industrie du recyclage, il devient possible d'effectuer un suivi de la qualité à une étape cruciale du cycle de vie des plastiques. Cependant, le contrôle qualité effectué à l'heure actuelle par les centres de tri manque de raffinement et n'offre que très peu d'information sur les flux de plastique post-consommation. D'ailleurs, il est reconnu que la gestion de la qualité dans l'industrie du recyclage est parfois déficiente, peut être en raison du manque d'encadrement normatif [37, 38].

Enfin, les paramètres de qualité visant le plastique voué à être transformé en agrégats pour béton restent à définir. Les études publicisées dans le domaine du béton ne se sont pas penchées sur la sensibilité potentielle du produit fini aux paramètres servant à évaluer la qualité des plastiques post-consommation pour le recyclage conventionnel.

1.6 Problématique chez Gaudreau Environnement Inc.

Le procédé de tri des plastiques en vigueur chez Gaudreau Environnement Inc. est schématisé à la Figure 1.10.

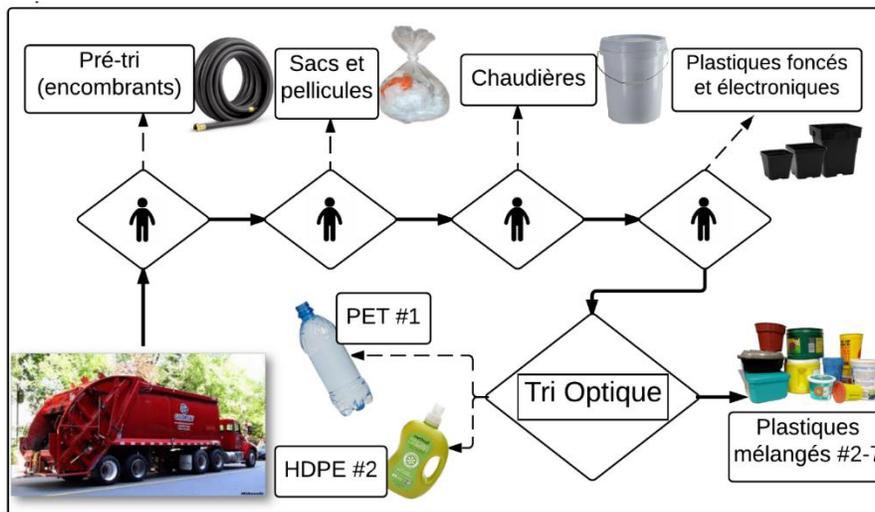


Figure 1.10 : Opérations de tri des plastiques chez Gaudreau Environnement Inc.

Les plastiques encombrants, tels les sacs, films, fils et boyaux, meubles de jardin et chaudières sont retirés manuellement des lignes de tri. Ces produits sont assez gros pour pouvoir être facilement repérés et isolés par les trieurs, ce qui réduit le risque de bris des équipements mécanisés situés en aval. Les plastiques noirs ou très foncés sont aussi retirés manuellement car ceux-ci ne peuvent pas être analysés par le lecteur optique. Le PET et les bouteilles de HDPE sont triés par une unité de tri optique NIR (Mistral, Pellenc ST). Les autres plastiques (LDPE, PP, PVC, PS, autres et contenants HDPE) forment un flux de contenants mélangés qui sera mis en ballots et vendu tel quel.

Gaudreau Environnement Inc. achemine présentement la quasi-totalité de son plastique mixte chez Produits Re-plast, manufacturier de madriers de plastique composite et de mobilier urbain. La manufacture de madriers de plastique crée un débouché pour les

polyoléfines (PE et PP), qui confèrent les propriétés voulues au produit et peuvent être compatibilisées à l'aide d'additifs. Ce procédé permet la présence d'autres polymères, comme le PVC, le PS, ou autres polymères, mais en faibles quantités car ces derniers sont considérés comme des impuretés. Cette collaboration de longue date entre les deux entreprises n'a pas demandé un suivi attentif de l'évolution du flux des plastiques mélangés. Par conséquent, la composition exacte des plastiques mélangés est inconnue. De plus, une présence importante de plastiques à faible volume (PS, PVC) et de plastiques émergents (présents dans la catégorie #7, ex : PLA) est soupçonnée.

L'entreprise est aux prises avec un manque d'informations fiables sur la composition et la qualité des ballots de plastiques mélangés, et la solution présentement privilégiée pour leur recyclage pourrait être compromise. La technologie des madriers de plastique impose certains seuils sur la présence de contaminants. Ce débouché pourrait ne pas convenir pour absorber une montée massive de la présence de certains plastiques émergents, qui contribuent à abaisser la qualité globale du flux des plastiques mélangés.

1.7 Objectifs et organisation du mémoire

Ce mémoire de maîtrise présente les travaux qui ont été effectués dans le but de répondre à deux problématiques distinctes mais complémentaires. Le premier objectif était de développer un protocole de caractérisation avancé afin d'évaluer la qualité du plastique vendu par les centres de tri. Une campagne d'échantillonnage effectuée sur une année complète a permis d'étudier la composition en polymère et en types d'emballage du flux des contenants mélangés #2-#7. Ensuite, ceux-ci ont été caractérisés en fonction des trois volets servant à évaluer la qualité des plastiques voués au recyclage thermomécanique. Ces nouvelles données ont permis de cibler les sources de contamination et d'impuretés déterminantes, qui par leur concentration ou leur variabilité influencent la qualité des plastiques mélangés récupérés chez Gaudreau Environnement Inc. Ces travaux font l'objet du chapitre 2 de ce mémoire.

Le deuxième objectif était d'effectuer une caractérisation orientée vers le recyclage des plastiques mélangés pour leur utilisation en tant qu'agrégats dans le béton. Les données recueillies dans l'exercice précédent (chapitre 2) ont été utilisées pour étudier l'influence des différents types de polymères sur les performances mécaniques et thermiques de bétons expérimentaux, de même que l'effet de la variation du flux de plastique pour une année complète d'échantillonnage. D'autres facteurs pertinents, comme le dosage des

agrégats et leur granulométrie, ont également été évalués afin de produire des bétons performants. Ces travaux, présentés sous forme d'article au chapitre 3, ont permis de définir les critères de qualité des plastiques propres à cette technologie de valorisation. Celle-ci pourrait s'avérer une solution intéressante pour les plastiques mélangés récupérés chez Gaudreau Environnement Inc., car elle est moins contraignante que le recyclage thermomécanique conventionnel.