



HAL
open science

La recyclabilité des polymères : une idée simple qui complique tout

Mathieu Baudrin

► **To cite this version:**

| Mathieu Baudrin. La recyclabilité des polymères : une idée simple qui complique tout. 2021. <hal-03794739>

HAL Id: hal-03794739

<https://hal.science/hal-03794739v1>

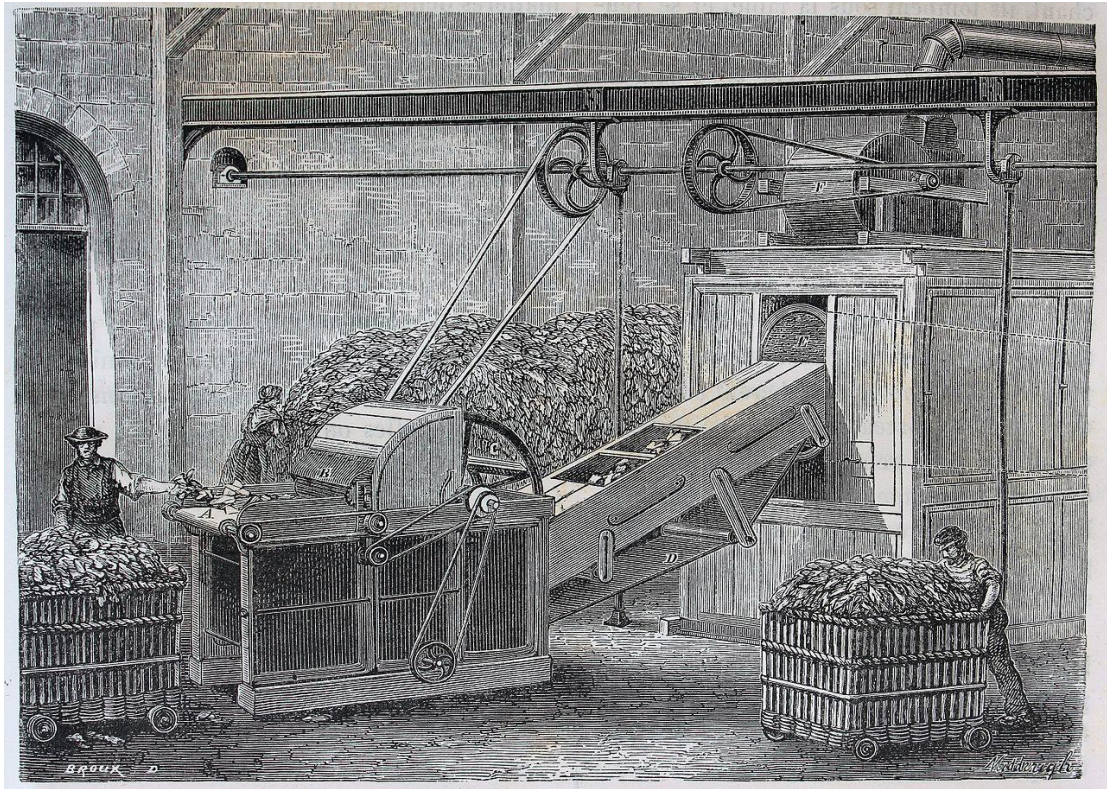
Submitted on 3 Oct 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization



La recyclabilité des polymères

UNE IDÉE SIMPLE QUI COMPLIQUE TOUT

Mathieu Baudrin – Centre de Sociologie de l'Innovation
Institut Carnot Mines | 31-03-2021

Table des matières

Introduction	2
Le recyclage au XIXe : penser en boucles	4
Métabolismes et écosystèmes urbains	4
Penser en boucles dans l'ombre de la chimie	5
Des boucles locales.....	5
L'ouverture des boucles ou « la rupture métabolique » et l'entrée en scène des polymères.	6
Croissance et accumulation des déchets en polymères : les prémices d'un problème public (1950-1975).....	7
Critiques et enracinement des polymères thermoplastiques : Le cas du Polychlorure de vinyle (PVC).....	8
Les thermoplastiques, une infrastructure marchande qui accompagne l'essor de la grande distribution : le cas des bouteilles PET.	10
Élimination / Valorisation / Recyclabilité.....	11
Élimination	11
Valorisation	12
Recyclabilité	15
Le principe du recyclage appliqué aux polymères est remis en question.....	19
Recycler des polymères / recycler des additifs.....	19
Le recyclage détourne d'autres problèmes liés à l'usage des polymères.....	21
Enfermés dans des boucles ?	22
Conclusion.....	24
Bibliographie	26
Sources	30
Rapports	30
Publications.....	30
Sources juridiques	31
Web.....	31
Reportage vidéo.....	31
Entretiens	31

Introduction

La production mondiale de produits en polymères a doublé durant les quinze dernières années et cette croissance rapide des quantités de polymères mises en circulation ne semble pas ralentir¹. Cette situation a pour principale conséquence une accumulation importante d'objets comportant des polymères et dit « en fin de vie » partout sur la planète. Ces polymères sont omniprésents dans notre vie quotidienne. Il peut s'agir d'emballages alimentaires, d'appareils électroniques (smart phone, ordinateur, tablette), d'électroménager, de débris de véhicules routiers, de produits du bâtiment (fenêtre, tuyau, câblage), etc. Au-delà de la forme que peuvent prendre ces objets comportant des polymères, il est utile de préciser ici que la nature même des polymères est infiniment variable.

Dès le début de l'enquête, j'ai été confronté à la grande diversité des termes employés dans les documents que je lisais : « plastiques », « résine », « élastomère », « polymères de synthèse ». Il m'a donc fallu faire le point avec un spécialiste² pour parvenir à mieux saisir le sens donné aux mots utilisés lorsque l'on parle de matériaux à base de polymères. Un polymère est une molécule, une longue chaîne formée par la répétition d'un grand nombre (plus de 200) d'un même ensemble d'atomes appelé monomère, ces ensembles sont liés par des liaisons atomiques fortes. Le polyéthylène par exemple, est formé par la répétition de CH₂. Les matériaux à base de polymères sont très nombreux dans la nature (le bois, les carapaces d'animaux, les fils des toiles d'araignée, etc.). Les matériaux ou produits à base de polymères synthétisés à partir de biomasse fossile ou modifiés à partir de polymères naturels sont omniprésents dans notre vie quotidienne. Citons les exemples les plus courants, pneumatiques, vêtements, peintures, récipients, tuyaux, matériel médical, matériaux de structures, jouets, etc. Mais tous ces produits et matériaux ne sont que rarement appelés polymères, on leur préfère les termes de « matières plastiques » (mot sans définition claire qui englobe dans le langage courant les polymères capables de fondre et de se solidifier en gardant une forme donnée), « résines » (mot sans définition claire qui parfois se réfère à la matière polymères de base pour fabriquer des textiles, des « plastiques » ou des peintures), « caoutchouc synthétique » (mot issu d'un végétal qui a le sens de polymères réticulé, c'est-à-dire dont les chaînes polymères sont reliées entre elles) parfois appelé « élastomère » ou « latex synthétique » (au sens d'émulsion de polymères). Beaucoup de mots pour décrire des matériaux et produits dont l'ingrédient principal est un ou un ensemble de polymères. Pour les non-spécialistes, c'est-à-dire l'immense majorité d'entre nous, cette absence de définition claire due à la non-utilisation du mot correct (« polymères ») induit de nombreuses erreurs de jugement et d'appréciation et floute le périmètre de

¹ *Les additifs toxiques du plastique et l'économie circulaire*, rapport produit par Le Centre d'activités régionales pour la Consommation et la Production Durables (SCP/RAC) dans le cadre du Plan d'Action pour la Méditerranée (PAM), organisation appartenant au Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE). Septembre 2020 (58pages). http://www.cprac.org/sites/default/files/otherfiles/plastics__additives_-_final_-_french_-_high.pdf

² Entretien avec Patrick Navard, directeur de recherche au CNRS et spécialiste de la mise en forme des polymères.

présence des polymères dans le monde qui nous entoure. Cette ambivalence des termes demande à redoubler de vigilance à la lecture du moindre rapport pour bien prendre la mesure des chiffres et autres statistiques mobilisés dans les argumentaires et les décisions réglementaires. Par exemple, si l'on revient sur la première phrase cette introduction : « La production mondiale de produits en polymères a doublé durant les quinze dernières années ». La source d'où j'ai tiré cette information est un rapport produit par Le Centre d'activités régionales pour la Consommation et la Production Durables (SCP/RAC) dans le cadre du Plan d'Action pour la Méditerranée (PAM), organisation appartenant au Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) dont le titre est « Les additifs toxiques du plastique et l'économie circulaire ». Or si ce terme désigne aux yeux d'un expert, une catégorie bien spécifique des polymères « les thermoplastiques », les auteurs du rapport font référence à un ensemble indifférencié de « matières plastiques » :

« ...les produits chimiques toxiques présents dans la plupart des produits en plastique, y compris les jouets pour enfants, les emballages alimentaires, les ustensiles de cuisine, les vêtements, l'électronique et de nombreux autres produits de consommation courante. »³

Cette confusion entre des polymères de natures variables dépasse le problème de l'incompréhension entre expert et profane puisque comme nous allons le voir, la recyclabilité d'un objet en polymères dépend de la nature de ce dernier, de sa mise en forme, du nombre de polymères combinés, de son utilisation, de sa qualification réglementaire ou encore de sa valorisation économique.

Dans le cadre du projet de l'Institut Carnot, une recherche de six mois ayant pour objet « la recyclabilité des plastiques » m'a été confiée. La note de synthèse produite ici vise à donner une perspective historique sur l'élaboration du problème des déchets urbains et les pratiques de recyclage aux membres du projet tout en montrant les spécificités des polymères à cet égard. La note est organisée en quatre temps et suit un ordre chronologique. Dans un premier temps, je propose de revisiter les pratiques de recyclage à partir de travaux d'historiens ayant étudié la dynamique des métabolismes urbains en France au XIXe siècle. Cette entrée en matière nous amène ensuite à considérer à l'émergence du problème des déchets urbains au XXe siècle tout en mettant ce phénomène en parallèle avec la naissance et l'enracinement des activités industrielles liées aux polymères. Dans la troisième partie, je me suis basé sur les textes de loi et des entretiens pour reconstituer une généalogie des modalités de traitement des déchets allant de l'élimination au recyclage. La sous-partie (3.3) aborde la question de la *recyclabilité des polymères* qui est au cœur du projet Carnot qui débutera en septembre prochain et propose des pistes de réflexion pour penser ce phénomène. Enfin, la dernière partie donne à voir une série de prises de position plus ou moins radicale concernant la pertinence du principe même du recyclage lorsqu'il est appliqué aux polymères.

³ http://www.cprac.org/sites/default/files/otherfiles/plastics__additives_-_final_-_french_-_high.pdf

L'enquête a été menée en partie dans les conditions du confinement lié à la pandémie, ce qui explique le manque de données issues d'observations directes des centres de tri et de régénération qui auraient pu amener des informations plus détaillées sur les problématiques techniques et économiques qui intéressent les partenaires du projet. L'enquête documentaire faite de lectures et d'analyses de rapports, d'articles de presse et de littérature primaire et secondaire sur le sujet a ainsi été privilégiée. J'ai également pu mener une dizaine d'entretiens en visioconférence ou par téléphone avec des spécialistes du recyclage, des élus, et des spécialistes des produits en polymères. Ils ont chacun fait l'objet d'une retranscription partielle ou complète de leur contenu.

Le recyclage au XIXe : penser en boucles⁴

MÉTABOLISMES ET ÉCOSYSTÈMES URBAINS

À l'image des humains qu'elles abritent, les villes ont été conçues et étudiées comme des organismes animés par des flux de matières, des *métabolismes urbains*. La notion de métabolisme fait référence à une série de réactions chimiques ayant lieu au sein d'une entité biologique et permettant notamment son maintien en vie. L'écosystème urbain est une autre notion utilisée pour décrire ce que les villes consomment et ce qu'elles rejettent. En appliquant de manière métaphorique ces notions biologiques à la dynamique matérielle des espaces urbains, les historiens (Jugie, 1993 ; Barles, 2002, 2005) et les écologues (Odum, 1989) mettent en lumière les impacts de l'activité urbaine, agricole et industrielle au XVIII, XIX et XXe siècle. De ces histoires des flux de matières urbaines se dégagent des figures mythiques, comme le chiffonnier du XIXe (Guiot, 1986 ; Compagnon, 2017), qui symbolisent à elles seules l'idée de la récupération des matières et de leur valorisation dans un circuit à l'échelle industrielle.

L'historienne Sabine Barles décrit à ce titre toute une économie des flux de matières générés entre les trois pôles que sont les villes, l'industrie et l'agriculture (Barles, 2005). C'est ainsi que les os issus des animaux sont réutilisés pour purifier le sucre de betterave grâce au charbon animal, pour produire des sels ammoniacaux servant à produire l'alun nécessaire à la tannerie, ou encore pour la fabrique d'objets du quotidien comme des peignes. Les chiffons constituent un autre exemple intéressant de l'étude des flux urbains. En tant que matière première de la fabrication de papier, les chiffons font l'objet d'une collecte systématique et très organisée dans les villes de France et du reste de l'Europe. La première moitié du XIXe voit ainsi croître en France une industrialisation conjointe de la collecte de chiffons et de leur transformation pour fabriquer le papier qui est, à cette époque, le support nécessaire à l'expansion croissante des affaires administratives de l'État (André, 1996). Entre les os et les chiffons auxquels Sabine Barles

⁴ Cette première entrée en matière est largement inspirée des travaux historiques menés par Sabine Barles dans son ouvrage « L'invention des déchets urbains. France : 1790-1970 » paru en 2005. J'invite le lecteur souhaitant davantage de détails à se référer à ce travail mentionné dans la bibliographie.

ajoute les eaux et boues usées, c'est tout un métabolisme urbain associant la ville, l'activité industrielle et l'agriculture qui prend consistance au XIXe.

PENSER EN BOUCLES DANS L'OMBRE DE LA CHIMIE

La pensée dans les termes du métabolisme (ou de l'écosystème) suppose une dynamique de « boucles » qui a été explicitée au XIXe siècle. En effet, au moment même où les villes, les industriels et l'agriculture cherchaient mutuellement à mettre à profit leurs interdépendances, des penseurs contemporains problématissent ces relations. Justus Liebig (1803-1873), personnage central de l'histoire de la chimie en Europe, peut être considéré comme le penseur précurseur de la pensée des cycles de matières. À partir de ses travaux en agronomie sur ce thème, il arrive notamment à la conclusion que « toutes les contrées de la terre où la main de l'homme n'a pas rendu aux champs les éléments nécessaires à la production des récoltes, après avoir eu la plus nombreuse population, sont arrivées à la stérilité et à la ruine » (Barles, 2005, p. 130). Des hygiénistes de la même époque comme Durand Clay ou Arnould, formulent des idées similaires selon lesquelles des boucles de matières peuvent être bénéfiques tant sur le plan sanitaire qu'économique. Le premier s'exprime à ce titre à propos d'éventuels bouclages des eaux usées et de l'azote qui mettraient en relation la ville et l'agriculture. Le second précise qu'il est souhaitable d'entretenir des cercles vitaux de matières qui « rendent au sol » ce qui lui a été pris par les moissons et l'élevage.

En suivant cette démarche, une des externalités émergentes de l'industrie du XIXe, la pollution des eaux de rivière par les matières organiques rejetées, se trouve en partie résolue par leur valorisation et la mise en place d'une autre forme de bouclage. Les eaux industrielles sont utilisées comme engrais agricole. D'une nuisance certaine, les rejets issus de ces activités industrielles deviennent une source de revenus intéressante. En toile de fond du développement de la pensée en boucles se trouve l'expansion de l'industrie du XIXe et des savoirs en chimie. En effet, c'est en étant capables de percevoir le monde comme un ensemble de molécules en interaction permanente les unes avec les autres que les entrepreneurs et les pouvoirs publics du XIXe élaborent ensemble un système dense d'interdépendance entre ville, industrie et agriculture.

Nous noterons pour la suite qu'une spécificité de cette pensée en boucle réside le fait de « rendre » à la terre ce qu'on a préalablement prélevé, transformé, usé, digéré... Cet ensemble de processus de transformation de matières est tout à fait étranger au monde qui verra le jour avec les polymères.

DES BOUCLES LOCALES

Ces récits d'historiens peuvent donner l'impression d'une ville tendant vers un équilibre statistique des flux de matières presque parfaits où rien ne se perd et tout se transforme dans une symbiose entre l'homme et son environnement⁵. Parfois la rareté d'un produit pousse les pouvoirs publics à en interdire la circulation au-delà des frontières comme ce put être le cas avec les chiffons. L'économie de flux ici décrite à l'échelle nationale

⁵ Sabine Barles nuance toutefois son propos à ce sujet en précisant à la page 131 (Barles, 2005) que « l'absence de déchet ne veut pas dire absence de pollution ».

demeure bien souvent organisée à l'échelle d'une ville et de sa proche banlieue. Le modèle métabolique local de l'espace urbain laisse supposer une dépense réduite d'énergie pour les transports de matières. Cependant, la dimension énergétique du métabolisme urbain n'est pas le centre des études de cette période qui demeurent davantage focalisées sur les quantités de matières circulantes et leurs prix. Un autre aspect brièvement évoqué par Sabine Barles concerne les conflits générés par l'accroissement de ces flux et leur traitement lors de l'expansion de l'industrie. Elle fait alors référence aux travaux des historiens de l'environnement à propos à la loi de *commodo et incommodo* appliquée par les cours de justice à la suite du décret de 1810 (Massard-Guibaud, 1999, 2010).

Dans la suite de cette note de synthèse, nous verrons que ces deux dimensions, que sont la dépense énergétique et la prise en considération des résistances, constituent de nos jours des éléments récurrents mobilisés pour défendre la pertinence de la dynamique de recyclage des polymères en France.

L'OUVERTURE DES BOUCLES OU « LA RUPTURE MÉTABOLIQUE » ET L'ENTRÉE EN SCÈNE DES POLYMÈRES.

Il est intéressant de noter que l'économie urbaine des boucles de matières est progressivement remise en cause à la fin du XIXe, notamment par l'expansion de nouvelles activités industrielles liées au développement des savoirs de la chimie (Barles, 2005 : Bensaude-Vincent & Stengers, 1993). Le cas du recyclage des os qui avait atteint son apogée aux alentours de 1870 est particulièrement éclairant à ce sujet. Parmi les sous-produits de cette activité de recyclage, la tabletterie qui employait les os les plus onéreux connaît à cette époque des mutations importantes dues à la découverte des premiers polymères, d'abord le celluloïd puis la Bakélite. Les produits dérivés du recyclage de l'os sont ainsi remplacés par des polymères thermoplastiques.

Dans leur ouvrage sur *l'Histoire de la Chimie*, Bernadette Bensaude-Vincent et Isabelle Stengers notent qu'une des premières « matières plastiques » mises au point par un inventeur new-yorkais était un « substitut d'ivoire pour fabriquer les boules de billard » (p. 254). Le celluloïd, ainsi découvert et mis en forme pour des usages aussi divers que les dentiers, les objets de lingerie, ou les travaux d'ébénisterie décorative, devient rapidement un produit de remplacement tout à fait rentable de l'os. Et s'il remplace l'os dans bien des domaines, il étend aussi son emprise à d'autres secteurs comme la photographie et les films dont il permettra de révolutionner les supports. Le celluloïd et la bakélite s'immiscent ainsi progressivement dans les interstices de la vie quotidienne dans les années 1920-1930.

De manière générale, les « matières plastiques » (termes des auteurs) ont pour principale caractéristique d'avoir été conçues d'abord « comme des ersatz, des produits de remplacement de substances naturelles trop rares ou trop coûteuses » (Bensaude-Vincent & Stengers, 1993, p.254), et bien souvent ces deux aspects sont liés. Les guerres jouent un rôle important dans ce processus de substitution et d'invention de nouveaux matériaux, notamment parce qu'il devient alors nécessaire de sécuriser les sources d'approvisionnement des matières stratégiques. L'industrialisation des processus de

fabrication qui permet d'abaisser les coûts est aussi un facteur important de l'expansion de l'usage des polymères.

Nous voyons ainsi s'opérer au tournant du XIXe un phénomène qui couple à la fois ce que Sabine Barles nomme la *rupture des métabolismes urbains* qui engendre l'apparition des « déchets urbains » jusqu'alors considérés comme des matières premières, et ce qu'on peut considérer comme les débuts de la production industrielle des polymères. Alors que l'activité productive des matières plastiques est en passe de devenir rentable, l'économie des boucles de matières naturelles est, elle, en perte de vitesse. Les sites de transformation et de valorisation de ce qui est en train d'acquiescer le statut « déchets urbains » disparaissent les uns après les autres pour laisser la place à un modèle productif tout à fait différent. La production d'objets en matières plastiques, tout comme d'autres matériaux inventés aux XXe siècles pour résoudre différents problèmes pratiques, annonce l'âge des matières synthétisées, des matériaux composites et des alliages notamment pour les besoins des nouvelles technologies que sont l'aviation, l'automobile, l'électronique (Bensaude-Vincent & Stengers, 1993). Il faudra attendre un certain temps pour s'apercevoir de leur antagonisme profond avec les matières naturelles qu'elles remplacent en partie comme le bois, les tissus d'origine végétale, les produits issus des animaux ou certains métaux. Au-delà des processus de substitutions, ces matières synthétiques, dont les polymères sont la figure de proue, ouvrent la voie à un nouveau mode de penser le rapport à la matière. Bensaude-Vincent et Stengers précisent à ce titre qu'il ne s'agit plus d'imposer la forme à la matière dans sa masse, mais d'intégrer un maximum de fonctions dans un matériau. Cette nouvelle direction prise par les laboratoires de R&D de l'après-guerre (WWII) ne peut pas encore percevoir que cette démultiplication des fonctions des matériaux s'accompagne aussi d'une complexification de leur structure moléculaire interne dont les conséquences vont conditionner les enjeux futurs liés à la pollution environnementale, au recyclage et au traitement des déchets en général.

Croissance et accumulation des déchets en polymères : les prémices d'un problème public (1950-1975).

La période d'après-guerre se caractérise par un optimisme parfois démesuré concernant les bienfaits de l'activité productive qui est alors présentée comme un garant de l'émancipation individuelle et collective (Charbonnier, 2020). La société française s'engage dans plusieurs décennies de fortes croissances bien connues du grand public sous le vocable de « trente glorieuses » inventé et popularisé par Jean Fourastié en 1979, économiste ayant travaillé entre autres au Commissariat au Plan à cette période (Boulat, 2013). Cette période synonyme de modernisation d'après-guerre a été récemment revisitée par des historiens de l'environnement qui ont eu à cœur d'écrire une « autre histoire des trente glorieuses » et la qualifient tour à tour de « trente ravageuses », de « trente polluées » ou de « trente dangereuses » (Bonneuil & Frioux, 2013).

Cette posture critique vis-à-vis de l'historiographie ayant traité la période des années 1945 à 1975 a permis aux historiens de l'environnement de mettre en évidence que cette

croissance hors norme n'était « ni uniforme ni générale ». Entre 1949 et 1966, la croissance moyenne annuelle diffère ainsi d'un secteur à l'autre. Les secteurs liés à la fabrication de polymères, qui nous intéressent ici, sont parmi les plus dynamiques avec +10% de croissance par an pour le pétrole et les gaz hydrocarbures et +8% pour la chimie industrielle (Theys, 1981, p.412). Toujours selon le même décompte effectué par Jacques Theys (1981), entre 1962 et 1973 la production de PVC bondit de +393% et celles de matières plastiques en général de +425%. Au début des années 1970, la croissance en volume du nombre d'emballages est de +5% par an et de +15% par an concernant les matières plastiques.

En se basant sur ces statistiques de la « grande accélération de l'anthropocène » (Bonneuil & Fressoz, 2013 ; Steffen, Grinewald, Crutzen, et Mc Neil, 2011), Christophe Bonneuil et Stéphane Frioux (2013) concluent que « le contenu toxique des points de croissance augmentait » d'année en année. La croissance de cette période peut-être ainsi considérée comme le fruit de choix économiques, techniques et politiques dont nous percevons chaque jour plus clairement les impacts environnementaux à moyen et long terme. Dans un premier temps, nous allons voir qu'en ce qui concerne le PVC ces choix se sont imposés malgré des critiques et des résistances diverses, et que ces dernières, loin de parvenir à remettre en cause son développement industriel, ont pu parfois contribuer à son enracinement. Dans un second temps, nous mettrons en évidence l'émergence d'un problème public des déchets sur l'ensemble du territoire national. Si ces déchets ménagers sont un mélange de différentes matières, nous émettons l'hypothèse que la croissance des déchets de matières plastiques associée à leur résistance à l'auto dégradation a joué un rôle important dans la mise en visibilité générale de problème des déchets.

CRITIQUES ET ENRACINEMENT DES POLYMÈRES THERMOPLASTIQUES : LE CAS DU POLYCHLORURE DE VINYLE (PVC)

Le PVC constitue, avec la bakélite et le celluloïd déjà évoqués plus haut, un des polymères thermoplastiques emblématiques de l'essor de ce nouveau type de matière à partir de 1945. Cependant il a été montré que ce succès n'est pas synonyme d'un long fleuve tranquille, les marchés du PVC se sont ainsi développés dans un environnement critique tendu. Selon Mulder and Knot (2001), son enracinement dans nos sociétés actuelles serait précisément lié à ces résistances et aux réponses apportées par les industriels à leur égard. C'est à ce titre qu'un spécialiste des polymères affirme en 1966 que si ce matériau avait été découvert à son époque il aurait immédiatement été déclaré inutile et peu performant⁶.

Il a ainsi été montré que la mise au point du PVC n'a pas été motivée par un désir d'innovation face à un problème concret de physique des matériaux, mais plutôt par la volonté de certaines entreprises de la chimie de valoriser des surplus de production d'acétylène et de chlore (Mulder & Knot, 2001). Le PVC trouve ainsi son origine dans un problème de surproduction. Les premiers essais par le chimiste Zacharias Klatte en

⁶ Grassie, N. (1966). Dégradation, In *Encyclopedia of Polymer Science and Technology*, vol. 4., New York: John Wiley.

1904 sont loin d'être encourageants, le PVC produit s'avère fragile et sensible à la lumière et aux changements de température. Il faut attendre l'intérêt de grandes entreprises de la chimie industrielles comme Dupont, IG Farben et B.F. Goodrich dans les années 1930 pour que le PVC soit à nouveau mis sur le banc d'essai. Les investissements en R&D augmentent et des produits encore imparfaits trouvent néanmoins leur chemin auprès des consommateurs.

Au sortir de la guerre, les producteurs de PVC ajoutent différents additifs pour améliorer certaines propriétés physiques pointées du doigt et l'industrie déploie relativement rapidement une production industrielle. Dans les années 1960s, plusieurs entreprises productrices de PVC et notamment B.F. Goodrich, sont confrontées à de graves problèmes de santé au travail. Des employés développent des cancers du foie très spécifiques liés à l'exposition au gaz chlorure de vinyle (Angiosarcome). Si des agences d'état américaines (OSHA, EPA, FDA) et certains mouvements consommateurs comme le Health Research Group envisagent un temps la fermeture des usines, les membres de la Manufacturing Chemical Association ripostent. Ils mettent notamment en avant le fait que les marchés du PVC soient déjà très importants à cette époque, que ce soit dans le secteur du BTP ou pour la grande consommation, et qu'une fermeture des usines constituerait un désastre économique sans précédent. Les lieux de production sont adaptés à la nouvelle contrainte sanitaire et les postes autrefois exposés au gaz VC sont désormais davantage confinés et protégés. À la suite de cet épisode critique majeur, les industriels du PVC souhaitent faire oublier ce problème sanitaire en redorant leur image publique afin de garantir la pérennisation du commerce des différentes matières constituées de PVC. Mulder et Knot s'appuient sur le cas des entreprises néerlandaises de tuyaux et de fenêtres en PVC pour souligner que ces dernières ont engagé très tôt une politique proactive de recyclage des déchets générés par leurs produits respectifs notamment avec la mise en place de systèmes de collecte. La collecte des tuyaux en PVC multicouches dont la couche interne est en PVC recyclé constitue un bon exemple de ce phénomène. En revanche, les emballages plastiques en PVC considérés comme trop légers et trop dispersés dans les ordures ménagères ne subissent pas le même traitement.

Grâce au récit historique de Mulder et Knot, nous comprenons que l'enracinement du polymères PVC dans nos modes de vie s'est effectué malgré différentes critiques à son égard. Chaque critique a été prise en considération d'une manière spécifique par les industriels voyant ainsi une occasion d'améliorer le polymères pour ne pas laisser de place à des alternatives potentielles. Nous voyons également ici que la politique de précurseur du recyclage mise en place par les industriels néerlandais peut aussi constituer un moyen de renforcer l'enracinement du PVC en participant à lui donner une meilleure image auprès des consommateurs et des citoyens d'une part, et d'autre part en augmentant la surface économique du secteur par l'ajout des entreprises chargées du recyclage. Par ailleurs, le fait que seuls les tuyaux et fenêtres fassent l'objet d'une collecte systématique nécessaire à leur valorisation met aussi en évidence *une recyclabilité variable d'un même polymères* dépend certes de sa structure moléculaire,⁷

⁷ Un même polymères peut présenter des propriétés variables selon la manière dont les atomes de carbone et d'hydrogène sont associés. La forme géométrique (le motif monomère répété sur la chaîne), l'enchaînement des motifs, l'orientation des liaisons

mais aussi de sa mise en forme et du type d'objet fabriqué avec. Nous reviendrons sur ce critère de recyclabilité dans la suite de la note.

LES THERMOPLASTIQUES, UNE INFRASTRUCTURE MARCHANDE QUI ACCOMPAGNE L'ESSOR DE LA GRANDE DISTRIBUTION : LE CAS DES BOUTEILLES PET.

Si les applications du PVC ont participé du déploiement de nouvelles infrastructures (tuyaux, électricité, etc.), les autres polymères thermoplastiques ont joué un rôle important dans l'essor de la grande distribution à partir de la fin des années 1960. Les barquettes, les bouteilles et autres contenants ne constituent certes pas un réseau continu de tuyaux, de route ou de fil électriques. Cependant, mis bout à bout et associés à d'autres dispositifs techniques comme les moyens de transport et les lieux de stockage, ces petits objets permettent la circulation des marchandises sur de grandes distances. En assurant de meilleures conditions de conservations et en allégeant le poids total des aliments transportés, les emballages en polymères thermoplastiques ont permis entre autres d'absorber l'augmentation brutale de coût des hydrocarbures liée aux chocs pétroliers des années 1970. Et à ce titre, il a été montré un lien direct entre cet engouement pour les emballages plastiques et le début d'une crise au long cours concernant la gestion des déchets ménagers en milieux urbains (Hawkins, 2012).

Dans un ouvrage publié en 2015, intitulé *Plastic Water*, Gay Hawkins, Emily Potter et Kane Race mettent en évidence les conséquences sociales, économiques et politiques du développement des marchés des bouteilles en PET. Selon les auteurs, la bouteille en PET, au même titre que d'autres emballages plastiques, constitue un dispositif technique et marchand capable de réorganiser toute une filière et de changer les modes de consommation du produit qu'il emballe. De ce point de vue, l'emballage PET n'est pas simplement une nouvelle façon d'emballer des produits, mais bien l'élément d'un agencement sociotechnique plus vaste qui requalifie ce qu'il contient (Callon, Méadel, & Rabeharisoa, 2000), le détache de son environnement d'origine, le rend stockable et distribuable d'une nouvelle manière et constitue de ce fait un prisme nouveau qui transforme en profondeur les modes de commercialisation de la marchandise concernée. Toute une série de marques (Vittel, Évian, Cristalline, Hépar, etc.) voit le jour à cette époque et chacune d'entre elles vante des « qualités » de l'eau mise en bouteille jusqu'alors complètement laissée de côté par l'usage de l'eau courante.

Au-delà de ces aspects marketing, ce sont les pratiques de consommation qui évoluent avec l'apparition des bouteilles PET dans les années 1970. Ce contenant est plus léger et rend ainsi l'eau plus facilement transportable. Ces nouvelles propriétés changent le comportement des consommateurs et accompagnent ainsi le développement d'une consommation dite « nomade », ce qui ne sera pas sans conséquence sur les pratiques de recyclage comme nous le verrons par la suite. Enfin, la bouteille d'eau est aussi une concurrente de l'eau du robinet. Dans certaines villes (Bangkok, Hanoï), le recours à

entre atomes dans l'espace ainsi que la longueur de la chaîne formée sont autant de paramètres qui changent les polymères et donc aussi la dimension technique de sa recyclabilité.

l'eau en bouteille résulte d'une histoire particulière du (non) développement des réseaux d'eau potable.

Toutes ces caractéristiques liées à la plasticité des polymères thermoplastiques ont eu pour effet de modifier en profondeur notre rapport à l'alimentation et au commerce de denrées en général. De la même manière que le PVC a modifié la manière d'élaborer des infrastructures, nous avançons l'idée selon laquelle les thermoplastiques, utilisés à l'échelle massive de l'industrie agroalimentaire, constituent un nouveau type d'infrastructure marchande à la fin du XXe siècle. Cependant, contrairement à une installation infrastructurelle continue comme des tuyaux d'évacuation ou des câblages électriques, la responsabilité de l'entretien et de la gestion de cette infrastructure sont grandement distribués entre une myriade d'acteurs allant des producteurs jusqu'aux consommateurs en passant par les circuits de transport et de distribution. La responsabilité particulièrement distribuée de la gestion de cette infrastructure discontinue des emballages a conduit à une certaine négligence particulièrement saillante en bout de chaîne où les produits sont effectivement consommés. En effet, les municipalités se sont rapidement retrouvées confrontées à une masse grandissante de déchets ménagers, dont les polymères thermoplastiques qui présentent des propriétés problématiques de résistances à la dégradation. Dans la partie suivante, nous allons voir que cette situation a appelé une action publique locale et nationale prenant différentes formes selon les périodes en allant d'une logique de l'élimination à celle du recyclage.

Élimination / Valorisation / Recyclabilité

ÉLIMINATION

L'accumulation anarchique des déchets dans les communes conduit à la multiplication des décharges plus ou moins contrôlées entre 1950 et 1975. Aux nuisances olfactives s'ajoutent avec les polymères thermoplastiques des nuisances visuelles, certains terrains se trouvent recouverts d'emballages plastiques qui, contrairement à du papier ou des déchets organiques, se dégradent très lentement et demeurent ainsi visibles longtemps. Les sacs plastiques, véritables emblèmes de la grande distribution, volent et se dispersent bien au-delà des décharges et sont perçus comme des pollutions visuelles avant de devenir les pollueurs environnementaux et sanitaires que nous connaissons. Cette situation de plus en plus préoccupante pousse les pouvoirs publics français à prendre des mesures dès la fin des années 1960 (Rocher, 2007).

Les premières actions réglementaires sont menées par décret avec notamment une circulaire en 1962 qui fixe les règles de la décharge contrôlée, et le décret du 22/02/1973 qui précise entre autres les conditions de l'incinération. Comme le précise Laurence Rocher dans sa thèse, les préoccupations des pouvoirs publics à cette époque sont de l'ordre de la salubrité publique et de l'hygiène. Il ne s'agit donc pas encore d'une problématisation en termes de préservation de l'environnement. En 1975, la loi est publiée au Journal Officiel de la République Française s'inscrit dans la ligne directe de

cette première intention. Son objectif est de garantir une collecte généralisée des déchets ménagers et d'encadrer leur traitement. Si la loi mentionne déjà l'idée de valoriser les matières collectées en « récupérant des matériaux et de l'énergie », dans les faits le principe de « l'élimination » domine.

Les collectivités locales sont autorisées à créer une redevance pour s'acquitter de cette nouvelle obligation et l'article 6 présage déjà la contribution via « une juste rémunération » de la part des entreprises productrices d'objets ou de matériaux susceptibles de générer des déchets. Cependant, la généralisation de la collecte n'est pas synonyme d'une modalité de traitement homogène des déchets sur tout le territoire et l'incinération demeure une technologie onéreuse pour des petites municipalités. La mise en décharge contrôlée est privilégiée dans bon nombre de cas, voire recommandée par le ministère de l'Environnement. Les années 1980 sont aussi un moment de recomposition territoriale pendant lequel des intercommunalités voient le jour et grandissent en taille pour justement faire face à ces nouveaux coûts et trouver la bonne échelle d'optimisation du traitement des déchets.

VALORISATION

La valorisation des déchets en germe dans la loi de 1975 est à rapprocher du contexte économique et politique de cette époque qui voit soudainement se poser la question de l'indépendance énergétique nationale (Rocher, 2007). Les « déchets » deviennent des « matières secondaires » et cette problématisation nouvelle des déchets est le signe d'une volonté publique de mettre à profit des « synergies entre politique de l'environnement et politique économique » (Bertolini, 1998). La valorisation énergétique des déchets, tout comme la récupération et le recyclage, est alors aussi perçue comme des éléments d'une nouvelle politique industrielle (Destot & Hugo, 1992). Il s'agit d'une politique du compromis visant à faire des externalités négatives du système productif les bases d'un autre projet productiviste consistant à générer de l'énergie et de la matière à réutiliser. Cette option s'affirme avec la loi de 1992 qui lance concrètement la mise en œuvre d'un recyclage général des matières et donc aussi des polymères.

La nouvelle loi de 1992 reprend et affirme le principe de valorisation de la loi 1975. La terminologie de « l'élimination » est remplacée par un nouveau vocabulaire. Les mots « réemploi » et « recyclage » apparaissent et traduisent une nouvelle manière de comprendre le sens de la valorisation. Le texte traduit la volonté politique d'agir sur la fabrication et la distribution des déchets sur le territoire. Alors que le texte de 1975 définissait le « déchet » comme une chose abandonnée à collecter et à contrôler, le texte de 1992 donne naissance à la catégorie de « déchet ultime » qui accompagne le développement du traitement de ces déchets. Ce dernier se définit comme « ce qui n'est plus susceptible d'être traité dans les conditions techniques et économiques du moment »⁸. Tous les termes sont importants dans cette définition. En effet, elle pose en creux la définition du déchet désirable parce que valorisable économiquement.

⁸ Art. 1er de la loi no 92-646 du 13 juillet 1992 à propos de modifications apportées à la loi no 75-633 du 15 juillet 1975.

Formulée ainsi cette définition pose aussi la limite à la pratique du traitement qui relève intrinsèquement de la technologie disponible et de son coût de mise en œuvre.

Les ressources mises à disposition pour le traitement des déchets augmentent avec la mise en œuvre des filières Responsabilité Élargie du Producteur (REP) dans les années 1990. Pour chaque produit vendu, le producteur de l'emballage doit s'acquitter d'une écocontribution qui est ensuite reversée à un éco-organisme : Éco-emballage (1992) devenu Citéo aujourd'hui. Cette écocontribution est ensuite utilisée pour financer dans son ensemble une partie de la prise en charge des déchets tout au long de ces étapes allant de la collecte au centre de tri et au traitement⁹. L'écocontribution constitue une des ressources principales de l'émergence de la filière de recyclage des polymères en France, en particulier en ce qui concerne les emballages ménagers qui représentent 40% des polymères thermoplastiques commercialisés¹⁰.

Dès 1993, les producteurs de plastiques voient dans la mise en œuvre de la première filière REP « emballages ménagers » l'occasion de s'engager publiquement en faveur du traitement des polymères thermoplastiques utilisés :

« Éco-emballage c'est 1992 et Valorplast en 1993. C'était très clairement un engagement de l'industrie des plastiques pour pouvoir donner la garantie de reprise aux collectivités locales. Nos actionnaires sont les producteurs de matières plastiques. À l'époque ça s'appelait le syndicat des producteurs de matières plastiques et c'est devenu Plastic Europe. Et les fabricants d'emballages plastiques à travers « Elypso » aujourd'hui. Il y avait aussi le syndicat des eaux minérales. C'était vraiment un alignement de la chaîne de valeur. » (Entretien, Catherine Klein, DG de Valorplast)

Ces entreprises¹¹ créent Valorplast qui devient l'intermédiaire central ayant permis en une décennie le développement d'une industrie nationale du recyclage des polymères d'emballages. D'une part Valorplast garantit la reprise des emballages polymères collectés par les collectivités locales à un prix unique sur l'ensemble du territoire national et d'autre part l'organisme s'engage à fournir à des centres de traitement de polymères la matière dont ils ont besoin pour atteindre leurs objectifs de rentabilité. C'est cette double contractualisation qui a incité simultanément les collectivités locales

⁹ Entretien avec Catherine Klein, Valorplast.

¹⁰ 10% automobile, 20% BTP et 6% pour les appareils électriques (Source : Les filières de recyclage de déchets en France métropolitaine, rapport demandé par madame la ministre de la Transition écologique et solidaire, janvier 2020)

¹¹ Les principaux actionnaires de Valorplast aujourd'hui : Plastic Europe, Elypso et la Fédération de la Plasturgie.

à développer la collecte et les acteurs de la filière à investir dans des installations de taille industrielle¹².

Malgré les efforts financiers consentis par les producteurs d'emballages polymères via l'écocontribution¹³, les coûts liés à la collecte et au traitement de ces matières ne cessent de croître. Certaines communautés de communes estimant ne pas avoir suffisamment développé de solutions locales de traitement s'attendent d'ailleurs à un « véritable tsunami fiscal »¹⁴ dans les prochaines années. Cette augmentation des coûts est liée d'une part à l'augmentation du volume de déchets à collecter, mais aussi aux conditions de leur traitement (décharge contrôlée, incinération, régénération). En effet, si la décharge contrôlée demeure la solution la moins onéreuse et la plus rentable majoritairement employée dans les années 1980 et 1990¹⁵, elle est amenée à disparaître progressivement, notamment avec la décision de ne permettre le stockage que pour les « déchets ultimes » à partir du 1er juillet 2002¹⁶. Les deux autres options, l'incinération et la régénération de polymères représentent l'une comme l'autre des coûts relativement importants qui conduisent les municipalités organisant la collecte et le tri à augmenter encore la taille des communautés de communes afin de répartir les augmentations de charges¹⁷.

Comparée à un autre mode traitement des polymères, l'incinération présente l'avantage de la certitude comme le souligne Bertrand Bohain :

« Il faut savoir que dans ces années-là, il y avait 2 grands opérateurs et honnêtement quand on brûle ou qu'on met dans un trou c'est le l'argent qui rentre tout seul : « j'achète mon trou, je mets en place mon incinérateur et chaque tonne qui rentre me rapporte de l'argent ».
(Bertrand Bohain, Cercle National du Recyclage).

Une fois passée l'étape parfois périlleuse de l'installation d'une solution de traitement, comme cela a pu être le cas avec un projet d'incinérateur en Indre-et-Loire qui a été avorté¹⁸, il suffit de collecter et d'acheminer les déchets à brûler vers ce centre. Les

¹² L'usine Wellman installée à Verdun ; L'usine Freudenberg située à Colmar.

¹³ Des efforts qui sont répercutés sur les prix de vente et donc aussi financés par le consommateur qui, en tant que citoyen paye la taxe sur les ordures ménagères, finance ainsi deux fois la gestion des problèmes des emballages polymères.

¹⁴ Entretien avec Jean Luc Galliot, Géographe et maire de la commune de Notre-Dame-d'Oé (1989-2020)

¹⁵ Entretien avec Bertrand Bohain, Cercle National du Recyclage ; entretien avec Jean Luc Galliot, Géographe et maire de la commune de Notre-Dame-d'Oé (1989-2020).

¹⁶ Loi no 92-646 du 13 juillet 1992 relative à l'élimination des déchets ainsi qu'aux installations classées pour la protection de l'environnement.

¹⁷ Entretien avec Bertrand Bohain, Cercle National du Recyclage

¹⁸ Entretien avec Jean Luc Galliot, Géographe et maire de la commune de Notre-Dame-d'Oé (1989-2020) ; Rocher, L. (2007). *Gouverner les déchets. Gestion territoriale des déchets ménagers et participation publique*. Géographie. Université François Rabelais – Tours.

polymères présentent l'avantage d'un potentiel calorifique conséquent et le désavantage de produire des fumées toxiques en brûlant qui devront être filtrées. Cependant, les pratiques de recyclage qui ont été poussées par la mise en place des filières REP en 1992 édictent un ordre de priorité qui place la valorisation énergétique en deçà d'autres solutions de traitement comme la régénération ou le réemploi. Dans ce contexte, certains polymères, comme le PET, le PEHD et le PP, ont pris de la valeur en dehors de circuits d'incinération au fil des années.

RECYCLABILITÉ

Nous faisons ici une différence entre le traitement des déchets par l'incinération ou par le stockage contrôlé, des pratiques qui concernent encore aujourd'hui une partie des objets en fabriqués en polymères, et la recyclabilité des polymères que nous associons à la possibilité de régénérer ces objets en polymères après leurs usages. *La recyclabilité peut ainsi être entendue comme l'ensemble des conditions à réunir pour qu'un objet en polymères puisse être réutilisé comme une matière première.* Ce principe rappelle à bien des égards les boucles de matières que nous avons décrites dans le contexte urbain de la fin du XIXe, néanmoins nous allons voir que ce principe de bouclage qui semblait vertueux pour les matières de cette époque mérite d'être questionné en ce qui concerne les polymères. En effet, les polymères sont une famille de composés chimiques présentant une grande diversité de propriétés et tous les polymères ne sont pas recyclables de la même manière. Parmi tous ceux qui sont recyclables, tous ne sont pas recyclés. Nous allons voir que la recyclabilité d'un polymère, ou d'une famille de polymères, dépend d'une multitude de paramètres.

« C'est important pour l'historique. C'est toujours intéressant de regarder l'histoire parce qu'on est en train de refaire la même chose avec de nouveaux plastiques. Les bouteilles étaient à prix négatif, donc il a fallu investir dans une vraie filière de recyclage pour trouver de la valeur à ces nouvelles matières : PET, PVC, PEHD » (Bertrand Bohain, Cercle National du Recyclage¹⁹)

L'enracinement des pratiques de recyclage par régénération des polymères est le fruit d'une alliance entre une politique publique initiée par Brice Lalonde dans les années 1990 et d'une politique industrielle initiée par les producteurs de polymères à la même période. Nous avons déjà évoqué le rôle économique de Valorplast dans ce processus qui garantissait l'approvisionnement des centres de traitement. L'autre mission de Valorplast a été de proposer des solutions alternatives à l'incinération des polymères synthétiques. L'organisme s'est donc aussi mobilisé dans la recherche appliquée afin d'améliorer les processus de tri et de régénération.

¹⁹ Le Cercle National du Recyclage est une association de collectivités locales qui ont la compétence de la gestion des déchets fondée en 1993. L'ensemble des collectivités locales membres de l'association représentent environ 30 millions de citoyens français.

La recyclabilité d'un type de polymères donné dépend de plusieurs facteurs qui sont liés tout autant à sa structure moléculaire qu'à la forme qu'on lui donne ou sa couleur, au circuit de distribution dans lequel il est utilisé, à la manière de le collecter et de le trier. L'étude des conditions dans lesquelles les premiers polymères thermoplastiques sont *devenus recyclables* en France nous permettra de mieux comprendre les enjeux pratiques de la recyclabilité des plastiques d'hier et de demain.

Prenons l'exemple des premiers objets en polymères qui ont été recyclés en France : les bouteilles et flacons (PET et PE). Comme le souligne Bertrand Bohain du Cercle National du Recyclage dans l'extrait cité, le prix de ces déchets plastiques est au départ négatif, ce qui signifie que le coût de leur collecte, de leur tri et de leur régénération dépasse les prix auxquels ils sont ensuite revendus pour la refabrication de nouveaux objets en polymères. La première action pour en augmenter la valeur économique a consisté à communiquer et à mettre en place un circuit spécifique de collecte afin de massifier le geste de tri des particuliers et donc d'augmenter le volume de bouteilles à envoyer par la suite dans les centres de tri. Une fois acheminé au centre de tri, l'ensemble du bac jaune²⁰ est trié. Dans les plus anciens centres de tri, cette opération repose sur un recours important à main-d'œuvre peu qualifiée et engagée pour raffiner le premier tri des particuliers en différenciant notamment les PET foncés des PET clairs. C'est une opération non seulement coûteuse, mais aussi pénible physiquement²¹ et mentalement²². L'étape suivante consiste à laver, décoller les étiquettes pour ensuite constituer des balles de matériaux polymères homogènes : PET clair, PET foncé, PEHD ou PP²³. La « mise en balle » est un processus de compactage des objets triés, comme des bouteilles par exemple, afin d'en faciliter le stockage et le transport. Les objets en polymères ainsi mis en balle sont prêts à être déplacés.

²⁰ Le bac jaune contenait jusqu'à récemment : papiers, cartons, bouteilles, flacons. Désormais s'y ajoutent tous types de contenants en polymères ainsi que les films plastiques depuis l'extension de la consigne de tri.

²¹ Entretien Catherine Klein, Valorplast. Mme Klein précise que les opérateurs soulèvent plusieurs tonnes de déchets polymères par jour.

²² Fourneau, C., Debil, F., Bourgeois, D., Deportes, I., Le Lay, S., Oppliger, A., ... & Levilly, R. (2020). Risques sanitaires pour les professionnels de la gestion des déchets. *Archive des Maladies Professionnelles et de l'Environnement*, 81(5), 677.

²³ Ce sont les principaux polymères utilisés pour les flacons et les bouteilles.



Figure 1 : Balles de PET stockées (Source: <https://www.laregion.ch/des-tonnes-de-bouteilles-en-pet-triees-par-couleur/>)

En dehors de quelques exceptions²⁴, les centres de tri et les usines de régénération sont des espaces différenciés et détenus par des sociétés différentes. À la sortie du centre de tri, les balles sont donc ensuite acheminées vers des centres de régénération spécialisés par type de polymères. En effet, chaque polymères nécessite de constituer sa propre filière de régénération²⁵.

Valorplast a accompagné les acteurs de ces filières pendant de nombreuses années afin d'améliorer la rentabilité de la nouvelle industrie de la régénération des emballages polymères. Les techniques de tri pénibles n'ont pas totalement disparu, mais plusieurs centres de tri se sont équipés de lecteurs optiques capables d'assister les agents notamment en triant les PET foncés et clairs. Ces lecteurs optiques combinés à des souffleurs sont capables de traiter une proportion conséquente du flux entrant. Un processus de standardisation des balles a permis d'accroître la qualité des matières premières des centres de régénération en garantissant notamment un pourcentage de

²⁴ C'est le cas notamment de l'entreprise CPA qui tri et régénère des PP dans la vallée de l'Ain (Entretien avec Pierre Blanc, PDG du Comptoir des Plastiques de l'Ain).

²⁵ Rapport sur *les filières de recyclage de déchets en France métropolitaine* demandé Madame la ministre de la Transition écologique et solidaire, janvier 2020, p.25. Nous avons aussi effectué un entretien avec l'un des rapporteurs, Benoît Legait, ingénieur général des Mines.

pureté de la balle²⁶ et un degré de compression adapté²⁷. Et sur le plan géographique et économique, Valorplast et Éco-emballage sont parvenus à trouver un certain équilibre entre la distance parcourue par les polymères entre les points de collecte et les centres de tri et la quantité suffisante attribuée à chacune des usines de régénération déployées sur le territoire français.

Cependant, cet équilibre économique garant de la pérennité de cette industrie émergente demeure précaire à plusieurs égards. D'abord à cause des conditions d'entrée des polymères dans le système de recyclage, la quantité de déchets à traiter est considérée par les acteurs du secteur comme finie. Ne peut être recyclé que ce qui est jeté et capté par la collecte. Ensuite en bout de chaîne après la régénération, les polymères recyclés et prêts à être réutilisés pour fabriquer d'autres objets sont quant à eux soumis à la concurrence des polymères vierges et des cours boursiers mondiaux des hydrocarbures. Si l'on reprend le cas des bouteilles en contrastant le verre et le PET. Les usines qui fabriquent des bouteilles en verre font le choix d'un procédé qui inclut ou non du calcin et ce choix n'est pas réversible. Une usine qui fabrique des bouteilles en verre recyclé devient captive de la nature de son approvisionnement. En revanche, les procédés de fabrication des bouteilles en PET demeurent toujours ouverts aux PET vierges.

« Le marché du RPET (PET recyclé) jusqu' à présent était fortement lié au marché du PET vierge. Jusqu'à il y a deux ou trois ans, les personnes utilisaient le RPET comme une variable d'ajustement de coût. Avec un PET vierge cher, ils mettaient beaucoup de 'recyclé' et inversement. »
(François Lagrue, Wellman Verdun)

La rentabilité d'un régénérateur de PET varie donc en fonction des cours de ces matières premières. Le fait que le « gisement » valorisable soit fini d'une part et que les débouchés soient soumis à la fluctuation des prix des polymères vierges d'autre part constitue un premier élément très concret d'une déstabilisation potentielle de toutes ces filières de régénération des polymères²⁸.

Malgré les difficultés et les faiblesses de l'industrie du recyclage de polymères que nous connaissons aujourd'hui en France, force est de constater que les initiatives ne cessent de se multiplier. Citéo souhaite s'approprier la valorisation des nouveaux polymères collectés avec l'extension de la consigne de tri (Pot de yaourt en polystyrène, film, etc.), de grandes entreprises de l'agroalimentaire mettent en avant leur engagement en faveur de l'usage de polymères recyclés et l'État français continue de financer des recherches universitaires allant dans ce sens. Cependant, des critiques plus radicales émergent

²⁶ Par exemple, une balle de PET clair ne doit pas comporter plus de 2% de matériaux autres.

²⁷ La maîtrise de la compression est essentielle. La balle doit être la plus compacte possible pour diminuer le volume à transporter sans pour autant être trop compressée auquel cas le déballage au centre de régénération devient plus coûteux.

²⁸ Entretien avec Pierre Blanc, PDG du Comptoir des Plastiques de l'Ain.

depuis quelques années et visent à remettre en question le principe même du recyclage des polymères.

Le principe du recyclage appliqué aux polymères est remis en question

Récemment, certaines initiatives émanant d'acteur de la filière REP existante comme Citéo, de services de R&D de grandes entreprises comme Nestlé, et de laboratoires de recherche visent à développer de nouvelles technologies de recyclage des polymères : recyclage chimique par dépolymérisation²⁹, pyrolyse,³⁰ etc. Cependant, le recyclage mécanique domine les pratiques actuelles dans la majorité des centres de régénération des polymères. Ce type de recyclage consiste à purifier, nettoyer et puis broyer les déchets en polymères préalablement collectés. C'est une technique actuellement utilisée pour régénérer plusieurs types de polymères : PET, PEHD, PP.

Prenons l'exemple de la filière du PET qui demeure à ce jour celle qui valorise le mieux le polymères collecté. En partant d'une bouteille en PET, le processus de régénération parvient ainsi à produire des paillettes de PET propres. Ces paillettes peuvent ensuite être transformées en granules de PET recyclé appelé « rPET ». Ce rPET peut ensuite être réutilisé pour fabriquer de nouveaux objets en PET. Si son degré de pureté le permet, il peut servir à fabriquer de nouvelles bouteilles. Il devra être associé à une certaine proportion de PET vierge. Moins pur, il peut aussi être utilisé pour fabriquer des vêtements auquel cas les granules devront être chauffés et étirés pour obtenir une fibre à tisser. Dans cette dernière partie nous souhaitons faire un état des lieux des prises de position de différents acteurs (associations, journaliste, entrepreneurs, scientifique) qui questionnent, chacun à leur manière, le principe même du recyclage des polymères.

RECYCLER DES POLYMÈRES / RECYCLER DES ADDITIFS

L'élaboration de la plupart des objets en polymères nécessite l'ajout d'additifs lors du processus de formulation. Certains additifs servent à colorer les plastiques, d'autres lui donnent de nouvelles propriétés comme une meilleure résistance à la lumière solaire, aux changements de température ou à l'agression des substances avec lesquelles le polymères entre en contact. Ces substances ajoutées dans la masse sont complètement intégrées au produit final et l'accompagne durant tout son cycle de vie, de la sortie de l'usine jusqu'à la régénération en passant par les phases de stockage. Certains de ces additifs sont soupçonnés d'être des perturbateurs endocriniens à l'origine de problèmes sanitaires récurrents : dérèglement thyroïdien, obésité, cancer, etc. Le Centre d'activités

²⁹ Walker, Theodore W., Nathan Frelka, Zhizhang Shen, Alex K. Chew, Jesse Banick, Steven Grey, Min Soo Kim, James A. Dumesic, Reid C. Van Lehn, et George W. Huber. « Recycling of multilayer plastic packaging materials by solvent-targeted recovery and precipitation ». *Science Advances*, 6, N° 47 (1er novembre 2020): eaba7599. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aba7599>.

³⁰ Matthieu Combe, Une nouvelle filière de pyrolyse des plastiques à l'étude, *Technique de l'ingénieur, Matériaux, Biotech & chimie*, 31 décembre 2019.

régionales pour la Consommation et la Production Durables a publié en septembre 2020 un rapport collectif³¹ sur le sujet dans le cadre du Plan d'Action pour la Méditerranée (PAM), une organisation appartenant au Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE). Dans ce document de synthèse s'appuyant sur des publications scientifiques récentes, les auteurs mettent en garde contre une approche trop naïve de l'économie circulaire lorsqu'il s'agit de polymères. De nombreux produits sont concernés comme les jouets, les appareils électroniques, les emballages alimentaires. Le rapport précise ainsi que si le recyclage répond à un principe de réalité immédiate concernant l'amoncellement croissant de déchets en polymères, cette manière d'aborder le problème ne prend pas encore assez en compte la question des additifs et du risque sanitaire global qu'ils engendrent. Le schéma proposé en tant qu'abstract d'un article récent (Hahladakis John N., et al., 2017) et reproduit ci-dessous (Fig. 1) met en évidence la multitude des opérations comprises dans le traitement des polymères et les potentiels dangers liés ces différentes phases.

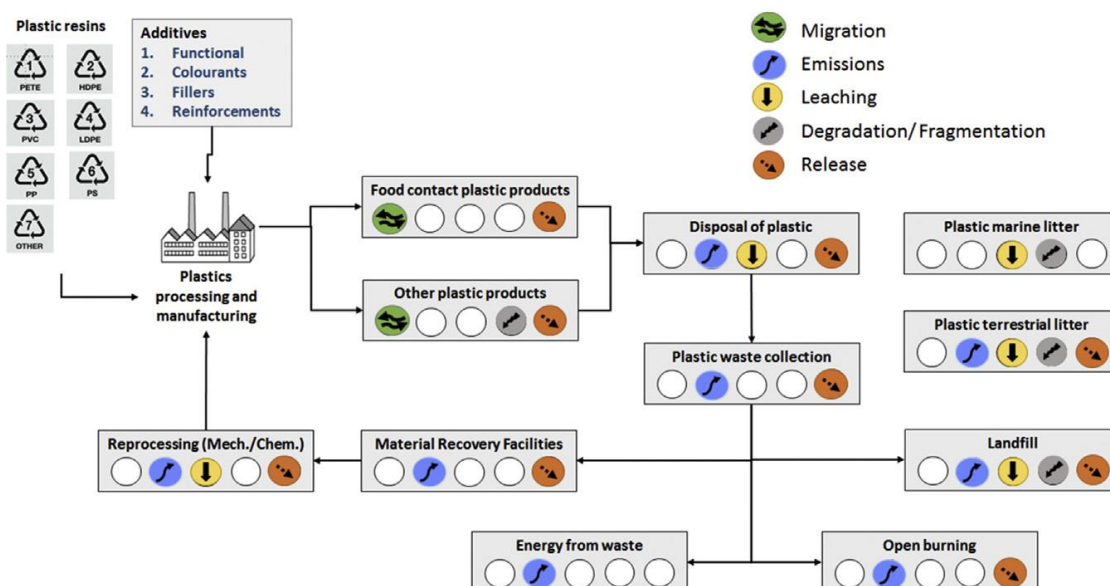


Figure 2 Source : An overview of chemical additives present in plastics: Migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling. Hahladakis, John N., et al. s.l. : Elsevier, 2017, Hazardous Materials.

Quelle que soit la modalité de traitement envisagée pour les déchets de polymères, nous comprenons avec ce graphique que les risques sont diversifiés, complexes à étudier et cependant inévitables tant que des polymères seront mis sur le marché et circuleront dans notre environnement.

En France, ce problème a déjà été identifié par les acteurs de la filière REP concernée. Il faut à ce titre noter l'initiative récente conjointe de Citéo, Valorplast et Elipso qui ont missionné l'organisme de recherche Cotrep en 2019 sur ce sujet. La mesure prise par Citéo n'est pas contraignante et consiste à diffuser auprès des fabricants un guide qui les

³¹ Les additifs toxiques du plastique et l'économie circulaire, septembre 2020. http://www.cprac.org/sites/default/files/otherfiles/plastics__additives_-_final_-_french_-_high.pdf

incite à modifier la conception des produits en polymères afin d'éviter le recours au « noir de carbone, de charges ou additifs modifiant la densité des emballages »³². Cette démarche représente certes un premier pas, mais elle ne répond que très partiellement aux inquiétudes formulées par les ONGs (Greenpeace, Zéro Waste, etc.) et des autorités publiques (en Europe ECHA et REACH) concernant les liens entre perturbateurs endocriniens et usage de polymères sous diverses formes (jouets, emballages, tuyauterie, etc.).

Un des principaux problèmes identifiés dans le rapport « Les additifs toxiques du plastique et l'économie circulaire »³³ concerne le manque d'informations disponibles au sujet de la composition chimique des produits en polymères qui sont redirigés dans les filières de recyclage. Rares sont les industriels enclins à divulguer la composition précise de leur produit. Cette situation de rétention d'informations génère une ignorance généralisée qui empêche une évaluation concrète et solide des risques encourus par les acteurs de la filière et les consommateurs. Les grandes entreprises du secteur de la chimie (Dow Chemical, Dupont de Nemours, B.F. Goodrich, Solvay, IG Farben, ICI), dont certaines sont impliquées depuis plusieurs décennies dans la production de polymères, ont déjà fait l'objet de travaux universitaires qui mettent en évidence une production délibérée de l'ignorance auprès des travailleurs et des autorités publiques (Markowitz & Rosner, 2002).

La présence d'additifs dans les polymères les plus courants combinée à un manque d'information significatif à leurs sujets (que celle-ci soit existante et non communiquée ou qu'elle demande à être élaborée) représente de premiers éléments d'une réflexion plus globale sur la pertinence du recyclage des polymères tel qu'il est pratiqué actuellement. Des versions plus radicales des critiques faites au principe du recyclage émergent depuis quelques années.

LE RECYCLAGE DÉTOURNE D'AUTRES PROBLÈMES LIÉS À L'USAGE DES POLYMÈRES

Flore Berlingen, militante écologiste directrice de l'association Zero Waste, a récemment publié un ouvrage intitulé *Recyclage, Le grand enfumage : comment l'économie circulaire est devenue l'alibi du jetable*. Si l'ouvrage ne traite pas spécifiquement du cas des polymères, il met néanmoins en scène une vision radicale de la question qui nous intéresse ici. L'auteure met en lumière les limites de la recyclabilité de certains matériaux dont les polymères sont un bon exemple en mobilisant par exemple le cas de PP souple en France. Les emballages en PP seraient en effet légers et fortement dilués dans les ordures ménagères, ce qui compromettrait grandement la rentabilité du circuit de collecte et de traitement nécessaire à les rendre recyclables. Elle montre également que cette limite des circuits de recyclage est loin d'être compensée par les efforts de conception. L'éco-organisme Citéo, qui est censé mobiliser un dispositif d'attribution de bonus et de malus aux producteurs d'objets et d'emballage comportant des polymères, est ainsi présenté comme juge et partie du problème général posé par les

³² Rapport annuel de Valorplast (2019), *Le plastique éclairé*, p8.

³³ Ibid. p17.

emballages comportant des polymères. Selon l'auteur, l'asymétrie importante entre le montant des bonus incitatifs et celui des malus traduit ce biais organisationnel inscrit dans le principe même de la filière REP (Berlingen, 2020, p31). La demi-mesure des sanctions via malus à l'égard des producteurs qui mettent sur le marché des produits difficilement recyclables a aussi été soulignée par Bertrand Bohain du Cercle National du Recyclage qui défend pour sa part l'idée d'un transfert de charges allant du citoyen et des collectivités locales vers les producteurs et les consommateurs, un modèle qui serait plus à même de responsabiliser l'ensemble des parties prenantes selon lui³⁴. Un malus important pourrait se traduire par un prix de revient trop élevé qui rendrait le produit moins attractif par exemple.

Une autre critique portée, entre autres, par Zero Waste et Flore Berlingen à l'égard du recyclage des polymères consiste à parler du « mythe du recyclage à l'infini » (Berlingen, 2020, cf. Chapitre 2). En partant du principe que seul ce qui a été collecté peut-être recyclé, l'auteure évoque les multiples « fuites » des boucles imaginées pour les filières de recyclage des polymères. Pour reprendre un élément mentionné plus haut dans cette note, le cas de la consommation nomade de bouteilles de boissons en PET complique substantiellement la collecte de ces dernières. Si les gares et certains lieux publics sont effectivement équipés de conteneur à double compartiment pour permettre un premier tri, force est de constater que beaucoup d'autres lieux où sont consommées des boissons contenues dans ces emballages jetables ne comportent pas ces dispositifs de premier tri. Dans ce dernier cas, les bouteilles en PET ne sont pas régénérées, mais enfouies ou incinérées. Plus généralement, les associations comme GreenPeace³⁵ et Zéro Waste défendent l'argument selon lequel le meilleur déchet est celui que l'on ne produit pas et de ce point de vue l'idée même du recyclage, en particulier lorsque celui-ci n'est pas couplé à la réduction des produits à usage unique, peut-être envisagée comme un alibi d'une économie du « tout jetable »³⁶.

ENFERMÉS DANS DES BOUCLES ?

Sans pour autant nier l'immédiate nécessité de traiter l'accumulation de déchets de tout type dont les polymères thermoplastiques les plus courants (PP, PET, PE) constituent une proportion importante, nous souhaitons ici mettre en lumière des effets de cadrage liés à cette problématisation. Nous entendons par problématisation et effet de cadrage l'idée selon laquelle dans une situation donnée certains acteurs (publics ou privés) vont participer à définir d'une part le problème et d'autre part les solutions induites par cette définition. Dans le cas présent, la perspective historique esquissée dans cette note de synthèse donne à voir la résurgence des pratiques de recyclage et de la pensée en boucle pour faire face à l'accumulation croissante de matières diverses générées par nos modes de vie depuis l'après-guerre. Nous avons notamment montré que l'élaboration des

³⁴ Entretien avec Bertrand Bohain, Cercle National du Recyclage.

³⁵ Communiqué de Greenpeace Luxembourg publié le 1 février 2019 : <https://www.greenpeace.org/luxembourg/fr/actualites/3836/et-si-on-arretait-de-croire-au-mythe-du-plastique-recyclable/>

³⁶ Site Zéro Waste : <https://www.zerowaste.fr/demarche-zero-waste/reduire-le-jetable/>

filiales de régénération des polymères thermoplastiques était le fruit de la conjonction d'une politique environnementale et d'une politique industrielle qui se concrétise à partir des années 1990. Or cette manière de prendre en compte le problème grandissant de l'accumulation de matières inutiles est en soi une proposition singulière qui cadre jusqu'à aujourd'hui la manière de penser le traitement des polymères. Si l'on prend le cas du Japon qui a fait le choix de favoriser l'incinération et d'améliorer les systèmes de traitement des fumées³⁷, on ne peut que constater que ce dernier contraste avec le cas français qui s'efforce encore aujourd'hui avec l'extension de la consigne de tri de promouvoir une industrie de la régénération.

Cette problématisation française du traitement des polymères par régénération produit un certain nombre d'angles morts à commencer par l'évaluation indépendante de l'ensemble des coûts des filiales concernées. En dehors des analyses de cycles de vie produites par Plastique Europe, il n'existe aucune étude permettant la comparaison entre une économie de la bouteille en verre et une économie de la bouteille en plastique. L'argument de la légèreté des contenants en PET revient régulièrement, mais il est mobilisé dans des modèles qui ne remettent pas en question d'autres paramètres comme la relocalisation des activités productives proche des lieux de ventes. Par ailleurs, le cadrage en termes de régénération ne permet pas d'aborder la question de la dispersion problématique des polymères dans les sols, les eaux et l'air mis en évidence dans des travaux de recherche récents. Enfin, l'attention médiatique présente une tendance à se focaliser sur les emballages ménagers³⁸ alors que d'autres objets en polymères représentent eux aussi des sources de pollution importante et parfois bien plus difficile à prendre en considération. Nous pensons ici aux vêtements en matière mixte comportant du polyester rejeté à chaque lavage et difficilement récupérable³⁹, aux pneus des véhicules routiers en élastomère dont l'usure représente 10% à 20% (Sieber, Kaweck & Nowack, 2020) des particules de polymères retrouvées dans les océans, ou encore à l'ensemble des produits électroniques dont l'imbrication de matières très variées (métaux rares, polymères, additifs dangereux) rend le traitement très coûteux.

Enfin, nous avons pu relever lors des entretiens menés des annonces gouvernementales parfois perçues comme contradictoires par les acteurs de la filiale. En effet, alors que l'Europe appelle à une réduction importante d'objets en polymères jetables, le gouvernement français continue à inciter les entreprises et les collectivités locales à l'investissement de moyen industriel important dans les filiales de recyclages. La perspective d'une réduction du flux des polymères collectés à moyen terme rentre ainsi en contradiction

³⁷ Inoue Y., Deputy Director, Recycling Promotion Division Environmental Regeneration & Resource Circulation (2018). Japan's Resource Circulation, Policy for Plastics, Communication auprès du Bureau Ministry of the Environment, Japan.

³⁸ Documentaire France 5, *Enquête de santé : Ces plastiques qui nous intoxiquent*, diffusés le 02/02/2021.

³⁹ [Les vêtements en plastique recyclé, une inextricable affaire \(de fibres\) - Le Temps](#)

Conclusion

Au terme de cette note de synthèse, nous prenons la mesure de la complexité de thème de recherche auquel le projet Carnot souhaite contribuer. Nous avons essayé avec nos outils et notre approche du sujet d'apporter un regard différent à ce sujet. La perspective historique peut paraître déroutante au départ, elle nous a néanmoins permis de mettre en évidence que les principes du recyclage ont été mis en œuvre à une échelle industrielle dès le XIXe siècle. À cette époque, l'industrialisation du principe des boucles de matières repose sur les savoirs en chimie qui prennent de l'importance au même moment. Il s'agit de rendre à un écosystème ce que l'on a prélevé pour paraphraser Justus Liebig. Si l'activité de recyclage a lieu à grande échelle et concerne de nombreux produits et objets, nous avons aussi constaté qu'elle se déroulait dans un périmètre resserré localement et suivait des cycles à la temporalité courte elle-même liée à la nature des choses recyclées. La rupture de cette économie du recyclage correspond précisément au moment de l'invention des déchets urbains (Barles, S. 2005). Et nous avons mis en évidence que cette rupture était concomitante à l'expansion de l'industrie chimique de la fabrication des polymères. Progressivement pendant les années 1930-40, et très rapidement après la Seconde Guerre mondiale, différents polymères s'enracinent dans nos sociétés en prenant des formes variées. À la fin des années 1960, la gestion des déchets (ménagers et industriels) devient un problème salubrité publique et nous avançons l'idée selon laquelle les objets en polymères à la fois colorés et persistants participent à la mise en visibilité de ce problème en s'accumulant dans les décharges et en se dispersant sur les territoires. Cette situation de plus en plus problématique appelle une action de la part du gouvernement et des autorités publiques de cette époque. L'action publique se découpe alors en deux temps marqués par deux lois successives. La loi de 1975, votée en pleine crise de l'énergie, problématise les déchets comme une source potentielle d'énergie, il s'agit alors « d'éliminer les déchets » pour des raisons de santé publique tout en valorisant ces derniers grâce au recours à des incinérateurs. La loi de 1992 instaure en pratique des principes de la valorisation en germe dans la loi de 1975. Elle incarne une nouvelle manière d'envisager le problème en conciliant contrainte environnementale et objectifs de relance de l'économie. Une véritable politique industrielle du recyclage est mise en place avec notamment la création des filières REP. Parmi les nombreux polymères concernés, ceux utilisés dans les emballages font partie des premiers concernés par ces mesures, le PET sous la forme de bouteilles et de flacons notamment fait partie des polymères précurseurs dans le domaine. L'exemple de l'élaboration de la filière REP emballages ménagers et la description de l'industrialisation du traitement des premiers polymères montre la complexité de la tâche liée au grand nombre de paramètres à prendre en compte pour garantir la recyclabilité d'un polymère : modalités de collecte, modalités de consommation, usage commercial, positionnement du polymère recyclé sur les marchés internationaux, type d'objet et combinaison de polymères différents, standardisation de la qualité, etc. Cette complexité rend l'industrie du recyclage des polymères à la fois difficile à mettre en place et difficile à maintenir puisqu'elle est exposée à de nombreuses incertitudes, ce qui la fragilise. Tout ceci invite à la prudence et à la réflexion concernant la recyclabilité des polymères à défendre tant au niveau de la recherche fondamentale que de la mise en pratique de ces savoirs à une échelle industrielle dans le cadre d'une action publique. La

recyclabilité des polymères appelle de ce fait à être sans cesse spécifiée par type d'objet et selon les modalités de régénération envisagée pour ne pas être prise comme allant de soi, mais comme un phénomène complexe à étudier pour en garantir la pertinence. À ce titre, la dernière partie de la note ouvre les perspectives. Sans nier l'impératif de gestion immédiate de nos rebuts, il s'agit avec ces prises de position d'inviter à penser la pertinence de ce modèle sur le moyen et le long terme pour ne pas s'enfermer sans le vouloir dans des boucles de matières problématiques.

Bibliographie

- André, L. (1996). *Machines à papier : Innovation et transformations de l'industrie papetière en France: 1798-1860*. Recherches d'histoire et de science sociales. Paris: Editions de l'Ecole des hautes études en sciences sociales.
- Barles, S. (2002). Le métabolisme urbain et la question écologique. *Les Annales de la recherche urbaine*, 92(1), 143-150.
- Barles, S. (2005). *L'invention des déchets urbains : France, 1790-1970*. Collection milieux. Seyssel: Champ Vallon.
- Bensaude-Vincent, B., & Stengers, I. (2001). *Histoire de la chimie*. Paris: La Découverte.
- Berlingen, F. (2020). *Recyclage : Le grand enfumage : comment l'économie circulaire est devenue l'alibi du jetable*.
- Bertolini, G. (1998). Collectes sélectives multi-matériaux de déchets ménagers. Approche des coûts de tri (en centre de tri). *Déchets, sciences et techniques*, INSA de Lyon, 10, pp.3-5.
- Bonneuil, C., & Fressoz, J.-B. (2013). *L'événement anthropocène : La Terre, l'histoire et nous*. Paris: Éd. du Seuil.
- Bonneuil, C. et Frioux, S. (2013). Les « Trente Ravageuses » ? : L'impact environnemental et sanitaire des décennies de haute croissance, dans Pessis, C., Topçu, S., & Bonneuil, C. (Éds.). (2013). *Une autre histoire des « Trente Glorieuses » : Modernisation, contestations et pollutions dans la France d'après-guerre*. Cahiers libres. Paris: La Découverte.

- Boulat, R. (2008). *Jean Fourastié, un expert en productivité : La modernisation de la France (années trente-années cinquante)*. Thèse. Besançon: Presses universitaires de Franche-Comté.
- Callon, M., Méadel, C., & Rabeharisoa, V. (2000). L'économie des qualités. *Politix*, 13(52), 211-239.
- Compagnon, A. (2017). *Les chiffonniers de Paris*. Bibliothèque illustrée des histoires. Paris: Gallimard.
- Charbonnier, P. (2020). *Abondance et liberté : Une histoire environnementale des idées politiques*. Paris: La Découverte.
- Destot, M., & Hugo, B. (1992). Rapport fait... sur les dispositions restant en discussion du projet de loi relatif à l'élimination des déchets ainsi qu'aux installations classées pour la protection de l'environnement. *Document de l'Assemblée Nationale*, (2849), pp. 1-60.
- Fourneau, C., Debil, F., Bourgeois, D., Deportes, I., Le Lay, S., Oppliger, A., ... & Levilly, R. (2020). Risques sanitaires pour les professionnels de la gestion des déchets. *Archive des Maladies Professionnelles et de l'Environnement*, 81(5), 677.
- Guiot, D. (1986). « Chiffonniers et récupération. Du chiffonnage au XIXe siècle à Paris à la récupération au XXe », mémoire de maîtrise, Institut français d'urbanisme, Université Paris 8.
- Hahladakis, J. N., Velis, C. A., Weber, R., Iacovidou, E., & Purnell, P. (2018). An overview of chemical additives present in plastics : Migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling. *Journal of Hazardous Materials*, 344, 179-199.

- Hawkins, G., Potter, E., & Race, K. (2015). *Plastic water : The social and material life of bottled water*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.
- Hawkins, G. (2012). The Performativity of Food Packaging : Market Devices, Waste Crisis and Recycling. *The Sociological Review*, 60(2_suppl), 66-83.
- Jugie, J.-H. (1993). *Poubelle-Paris, 1883-1896 : La collecte des ordures ménagères à la fin du XIXe siècle*. Paris: Larousse.
- Massard-Guilbaud, G. (1999). "La régulation des nuisances industrielles urbaines (1800-1940)". *Vingtième Siècle. Revue D'histoire*, Vol. 64, pp. 53-65.
- Massard-Guilbaud, G. (2010). *Histoire de la pollution industrielle : France, 1789-1914*. En temps & lieux. Paris: Éditions de l'École des hautes études en sciences sociales.
- Mulder, K., & Knot, M. (2001). PVC plastic : A history of systems development and entrenchment. *Technology in Society*, 23(2), 265-286.
- Odum, E. P. (1989). *Ecology and our endangered life-support systems*. Sunderland, Mass: Sinauer Associates.
- Pessis, C., Topçu, S., & Bonneuil, C. (Éds.). (2013). *Une autre histoire des « Trente Glorieuses » : Modernisation, contestations et pollutions dans la France d'après-guerre*. Cahiers libres. Paris: La Découverte.
- Rocher, L. (2007). *Gouverner les déchets. Gestion territoriale des déchets ménagers et participation publique*. Géographie. Université François Rabelais – Tours.
- Steffen, W., Grinevald, J., Crutzen, P., & McNeill, J. (2011). The Anthropocene : Conceptual and historical perspectives. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 369(1938), 842-867.

Theys, J. (1981). « Quelques données quantitatives sur les relations démographie-croissance-environnement en France entre 1945 et 1975. L'impact des Trente Glorieuses », *Cahiers du GERMES*, n°3, mai 1981, p. 371-424.

Sources

RAPPORTS

Les filières de recyclage de déchets en France métropolitaine, rapport demandé par madame la ministre de la Transition écologique et solidaire, janvier 2020

Les additifs toxiques du plastique et l'économie circulaire, rapport produit par Le Centre d'activités régionales pour la Consommation et la Production Durables (SCP/RAC) dans le cadre du Plan d'Action pour la Méditerranée (PAM), organisation appartenant au Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE). Septembre 2020 (58pages). http://www.cprac.org/sites/default/files/otherfiles/plastics_additives_-_final_-_french_-_high.pdf

Rapport annuel de Valorplast (2019), *Le plastique éclairé*.

Inoue Y., Deputy Director, Recycling Promotion Division Environmental Regeneration & Resource Circulation (2018). Japan's Resource Circulation, Policy for Plastics, Communication auprès du Bureau Ministry of the Environment, Japan.

PUBLICATIONS

Kole, P. J., Löhr, A. J., Van Belleghem, F., & Ragas, A. (2017). Wear and Tear of Tyres : A Stealthy Source of Microplastics in the Environment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(10), 1265.

Sieber, R., Kawecki, D., & Nowack, B. (2020). Dynamic probabilistic material flow analysis of rubber release from tires into the environment. *Environmental Pollution*, 258, 113573.

Matthieu Combe, Une nouvelle filière de pyrolyse des plastiques à l'étude, *Technique de l'ingénieur, Matériaux, Biotech & chimie*, 31 décembre 2019.

Grassie, N. (1966). Degradaation, In Encyclopedia of Polymer Science and Technology, vol. 4.,
New York: John Wiley.

SOURCES JURIDIQUES

Loi no 75-633 du 15 juillet 1975 relative relative à l'élimination des déchets et à la récupération
des matériaux.

Loi no 92-646 du 13 juillet 1992 relative à l'élimination des déchets ainsi qu'aux installations classées
pour la protection de l'environnement.

WEB

- Site de l'association *Zéro Waste*
 - <https://www.zerowastefrance.org/demarche-zero-waste/reduire-le-jetable/>
- Communiqué de Greenpeace Luxembourg publié le 1 février 2019 :
- Communiqué de presse *GreenPeace* :
 - <https://www.greenpeace.org/luxembourg/fr/actualites/3836/et-si-on-arretait-de-croire-au-mythe-du-plastique-recyclable/>
- [Les vêtements en plastique recyclé, une inextricable affaire \(de fibres\) - Le Temps](#)

REPORTAGE VIDÉO

Documentaire France 5, *Enquête de santé : Ces plastiques qui nous intoxiquent*, diffusés le
02/02/2021.

Entretiens

Patrick Navard, directeur de recherche au CNRS et spécialiste de la mise en forme des
polymères.

Catherine Klein, Déléguée générale de Valorplast.

Bertrand Bohain, Délégué général du Cercle National du Recyclage

Jean Luc Galliot, Géographe et maire de la commune de Notre-Dame-d'Oé (1989-2020)

Pierre Blanc, PDG du Comptoir des Plastiques de l'Ain.

François Lagrue, Responsable de opérations, Usine de régénération du groupe Wellman à Verdun.

Benoît Legait, Ingénieur général des mines.

Matthieu Glachant, Professeur d'économie, MINES Paristech, PSL University

Christophe Coquelet, Professeur Mines ParisTech, Directeur Centre Thermodynamique des Procédés

Maxime Sandrini, Product Group Project Manager chez Sidel

Catherine Jung, Environment & Recycling Manager, ArcelorMittal France

Jean-Marie Vannier, maire de Vou et membre du bureau de l'intercommunalité de Loches Sud Touraine en charge de la gestion des déchets