

Veille Technologique et Intelligence Économique

Le poly(furanoate d'éthylène), polymère biosourcé, peut-il remplacer le poly(téréphtalate d'éthylène) ?

Rendu le Mercredi 23 Mai 2018

Grenoble INP PAGORA

Sommaire

Lexique	p 2
Introduction	p 3
I- Mise en contexte	p 4-11
A) Historique de la fabrication des bouteilles plastiques	p 4
B) Caractérisation du PET et du PEF.....	p 4
C) Les diverses utilisations du PET et du PEF	p 7
a) Données économiques	p 8
b) Données statistiques	p 9
D) Le contexte législatif des bouteilles plastiques alimentaires	p 10
E) Analyse de l'impact sur le développement durable	p 11
II- Les principales solutions techniques actuelles	p 13-28
A) Production de PET	p 13
a) La fabrication du PET par étapes	p 13
b) La production de PET dans le monde	p 18
c) Les facteurs limitants.....	p 19
B) Production de PEF	p 20
a) La fabrication du PEF par étapes	p 20
b) La production de PEF dans le monde	p 23
c) Les facteurs limitants.....	p 24
C) Comparaison des procédés du PET et du PEF	p 26
D) Production de bouteilles	p 26
E) Perspectives d'évolution technique	p 28
III- Analyse concurrentielle et scénarios de développement.....	p 31-42
A) Variables essentielles et facteurs de développement	p 31
a) Variables essentielles	p 31
b) Facteurs clés de développement	p 33
B) Diagramme de PORTER et chaîne de valeur	p 34
a) Diagramme de PORTER	p 34
b) Chaîne de valeur	p 38
C) Scénarios et analyse des risques associés.....	p 39
D) Matrice SWOT	p 42
Conclusion.....	p 43
Bibliographie.....	p 44

Lexique

anglais	français
bioMEG : biobased Ethylene Glycol	= éthylène glycol biosourcé
COP : Cyclo Olefin Polymer	= polymère de cyclo-oléfine
DMSO : DiMethyl SulfOxide	= sulfoxyde de diméthyle
FDCA : FuranDiCarboxylic Acid	= acide furane dicarboxylique
HMF : HydroxyMethylFurfural	= hydroxyméthyle de furfural
HDPE : High Density PolyEthylene	= polyéthylène haute densité
LLDPE : Linear Low Density PolyEthylene	= polyéthylène basse densité linéaire
LDPE : Low Density PolyEthylene	= polyéthylène basse densité linéaire
MDPE : Medium Density PolyEthylene	= polyéthylène moyenne densité
MMF : MethoxyMethylFurfural	= méthoxyméthyle de furfural
PA : PolyAmid	= polyamide
PC : PolyCarbonate	= polycarbonate
PE : PolyEthylene	= polyéthylène
PEF : PolyEthylene Furanoate	= poly(furanoate d'éthylène)
PET : PolyEthylene Therephtalate	= poly(téréphtalate d'éthylène)
PETG : PolyEthylene Therephtalate Glycol	= poly(téréphtalate d'éthylène glycol)
PLA : PolyLactic Acid	= acide polylactique
PMMA : Poly(Methyl MethAcrylate)	= poly(méthacrylate de méthyle)
PP : PolyPropylene	= polypropylène
PS : PolySaccharid	= polysaccharides
PVC : PolyVinyl Chloride	= poly(chlorure de vinyle)
PVC-BIO : PolyVinyl Chloride Biobased	= poly(chlorure de vinyle) biosourcé
RMF : AlkoxyMéthylFurfural	= alcoxyméthyle de furfural
TPA : TerePhtalic Acid	= acide téréphtalique

Introduction

Le poly(téréphtalate d'éthylène), plus connu sous le nom de PET, est un polyester thermoplastique, issu principalement du pétrole. Sa résistance et ses bonnes propriétés barrières en ont fait un matériau de choix pour la production de bouteilles plastiques alimentaires, ainsi que pour les films plastiques. Sixième plastique le plus produit au monde et quatrième plastique le plus utilisé, il représentait une production mondiale de 56 millions de tonnes en 2016. Grâce à sa recyclabilité, ce polymère a su s'imposer sur le marché des bouteilles plastiques alimentaires.

Cependant, bien que recyclable, le PET ne satisfait plus les exigences environnementales industrielles de plus en plus présentes. De ce fait, de nombreuses recherches sont effectuées pour parvenir à le remplacer. En effet, des recherches sont en cours pour produire un PET plus vert, plus durable : le bio-PET. De même, un autre polyester 100 % biosourcé et aux propriétés similaires apparaît, le poly(furanoate d'éthylène), ou PEF.

Notre étude vise à analyser l'avenir du PET vis-à-vis du PEF dans le secteur des bouteilles plastiques alimentaires. Au cours de ce rapport, nous répondrons aux mieux à la question suivante : "Le poly(furanoate d'éthylène), polymère biosourcé, peut-il remplacer le polytéréphtalate d'éthylène ?"

Pour cela, nous commencerons par étudier le contexte historique, législatif, économique mais également écologique du marché des bouteilles plastiques alimentaires. Dans un second temps, nous nous intéresserons aux principales solutions techniques utilisées actuellement en industrie et mentionnerons les principales perspectives d'évolutions techniques possibles. Enfin, nous réaliserons différents scénarios d'évolution concernant la place du PEF dans le secteur des bouteilles plastiques alimentaires, cela en se basant sur les variables essentielles principales, les facteurs clefs de développement, les menaces liées à ce produit, ou encore les concurrents présents sur le marché auxquels le PEF devra se confronter.

Les mots clés se rattachant au cœur du sujet sont précisés dans la liste figurant ci-dessous.

Liste des mots clés :

(français) PET, PEF, polymères, polymère bio-sourcé, bouteilles plastiques, plastiques transparents, emballage de liquides

(anglais) PET, PEF, polymers, bio-based polymer, plastic bottles, transparent plastics, beverage containers

Les molécules chimiques et les polymères ayant souvent de longues nominations, de nombreux acronymes ont été utilisés tout au long de ce rapport. Ces derniers sont listés et définis dans le lexique figurant page 2.

I- Mise en contexte

A) Historique de la fabrication de PET, PEF et des bouteilles plastiques

Les principales dates historiques concernant le PET et le PEF dans le secteur des bouteilles plastiques alimentaires sont présentées ci-dessous :

1941 : Le PET est breveté par deux chimistes britanniques, John Rex Whinfield et James Tenant Dickson. L'invention reste secrète pour des raisons stratégiques liées à la deuxième guerre mondiale.

1945 : Rachat du brevet PET par le groupe américain Dupont de Nemours.

1950 : Dépôt du brevet de la marque Dacron par Dupont de Nemours.

1984 : Le PET s'impose sur le PVC pour la production de bouteilles. Le PET est pour la première fois produit en masse.

2009 : la "Coca Cola Plant Bottle" est mise sur le marché. Cette bouteille est la première bouteille en PET recyclable sur le marché.

Juin 2011 : Partenariat entre Toray et Gevo pour produire un PET renouvelable biosourcé en laboratoire. Production de bouteilles mais également de films plastiques. Toray utilise l'acide téréphtalique issu du para-xylène et du MEG pour obtenir du PET.

8 Décembre 2011 : Avantium ouvre son usine pilote de PEF à Geleen, Pays-Bas [Avantium]

15 Décembre 2011 : Coca-Cola, Ford, Heinz, NIKE, et P&G annoncent la création d'une usine PTC (PET Technology Collaborative) pour produire un PET 100% bio-basé suite au succès de la "Plant bottle" de Coca-Cola

2014 : Naissance du consortium Avantium pour la production de PEF

2016 : Avantium prévoit la production de FDCA et PEF

L'invention du PET est relativement ancienne en regard des débuts de son développement à grande échelle. En outre, cet historique illustre combien le secteur des bouteilles plastiques évolue au rythme des décisions des grands industriels.

B) Caractéristiques et propriétés du PET et du PEF

Le poly(téréphtalate d'éthylène) et le poly(furanoate d'éthylène), respectivement abrégés en PET et PEF, sont deux thermoplastiques polyester. Tous deux ont été brevetés il y a plus de 60 ans, mais le PET étant issu de dérivés pétrochimiques, il est largement utilisé depuis les années 1990, tandis que le PEF, d'origine végétale, voit son utilisation encore en développement. Ci-dessous, un tableau récapitulatif des principales caractéristiques du PET et du PEF. [Wikipédia]

Le poly(furanoate d'éthylène), polymère biosourcé, peut-il remplacer le poly(téréphtalate d'éthylène) ?

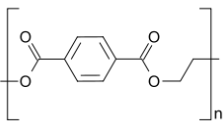
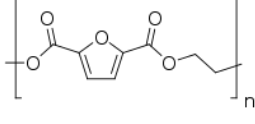
Caractéristiques	PET	PEF
Nom	Polyéthylène Téréphtalate (aussi abrégé en PETE)	Polyéthylène Furanoate, Polyéthylène 2,5-furandicarboxylate
Définition	Polyester de synthèse produit par polycondensation d'éthylène glycol avec de l'acide téréphtalique, ou d'éthylène glycol et de diméthyltéréphtalate [Actu environnement]	Polyester de synthèse produit par polycondensation d'éthylène glycol et 2,5-furandicarboxylic acid (FDCA)
Famille	Thermoplastique semi-cristallin	Thermoplastique semi-cristallin
Formule chimique	 $(C_{10}H_8O_4)_n$ <i>Figure 1a : Structure du PET [Wikipédia]</i>	 $(C_8H_6O_5)_n$ <i>Figure 1b : Structure du PEF [Wikipédia]</i>
Invention	Breveté en en 1941 par John Rex Whinfield et James Tennant Dickson	Breveté en 1951
Matières premières	Ethylène glycol : pétrole ou betterave sucrière ou canne à sucre Acide Téréphtalique : pétrole Pour 1 kg de PET, il faut 1,9 kg de pétrole brut.	Canne à sucre (monoéthylène glycol), plantes et résidus agricoles (acide furanique : le FDCA)

Tableau 1: Principales caractéristiques du PET et du PEF

Depuis les années 1990, le PET est devenu le premier plastique utilisé pour les bouteilles plastiques transparentes, notamment utilisées pour contenir des eaux minérales, des jus de fruits, ou des sodas. Cependant, l'utilisation de ressources pétrolières faisant de plus en plus face à de nombreuses controverses, le PEF a été développé dans le but de remplacer le PET dans la production de bouteilles. Les propriétés du PEF sont donc similaires voire meilleures que celles du PET, comme en témoigne le tableau ci-dessous :

Propriétés	PET	PEF	Comparaison
Masse volumique	1.36 g/cm ³	1.43 g/cm ³	Le PEF est plus dense que le PET
Commodité d'utilisation	Flexible	Le PEF devient plus rigide sous l'effet de la contrainte	Le PEF est moins souple que le PET mais il est plus résistant.

Le poly(furanoate d'éthylène), polymère biosourcé, peut-il remplacer le poly(téréphtalate d'éthylène) ?

Optique	Incolore	Incolore	Identique
Module d'Young	2.1-3.1 GPa	3.0-3.5 GPa	Le PEF est de 1.1 à 1.4 fois plus résistant que le PET.
Thermique	Tg = 76°C Intervalle de tenue en température de -60 à +100°C	Tg = 88°C	Meilleure stabilité thermique du PEF
Toxicité	Non toxique et apte au contact alimentaire Sensible aux UV	Non toxique et apte au contact alimentaire	Identique
Perméabilité	Bonne barrière à l'humidité et Mauvaise barrière aux gaz	O ₂ : 6 fois le PET CO ₂ : 3 fois le PET H ₂ O : 2 fois le PET	Le PEF a de meilleures propriétés barrières
Composition	Non biosourcé, ou en partie seulement	100% biosourcé (premier polyester)	Le PEF est issu de ressources 100% renouvelables.
Fin de vie	Recyclage mécanique ou bien recyclage chimique	Recyclage mécanique identique au PET ou bien recyclage chimique par dépolymérisation	Le PEF est plus facilement recyclable que le PET du fait de sa composition.
Emission de gaz à effet de serres	Lors de l'extraction des matières premières, de la transformation et du transport	Lors de l'extraction des matières premières, de la transformation et du transport, compensation lors de la croissance des matières premières.	L'origine végétale du PEF réduit les émissions carbone de 50 à 70%.
Conservation	Prolonge la durée de vie des liquides	Prolonge la durée de vie des liquides	Identique

Tableau 2: Principales propriétés du PET et du PEF

PEF et PET ont de nombreuses propriétés identiques. Cependant le PEF se distingue par de meilleures propriétés thermiques, mécaniques et barrières, idéales pour la production de contenants, et par son origine 100% biosourcée qui diminue les émissions carbonées. [Synvina]

C) Les diverses utilisations du PET et du PEF

Le PET est majoritairement utilisé pour la production de bouteilles, mais il peut être utilisé dans l'habillement, et pour les contenants de denrées alimentaires autres que liquides.



Les emballages en PET portent un anneau de Möbius dans lequel est inscrit le chiffre 1, et sous lequel peut être écrit le sigle PET ou PETE.

Figure 2 : Anneau de Möbius du PET [Wikipédia]

Il est également utilisé comme film plastique, par exemple comme support pour l'impression par transfert thermique, souvent utilisée pour les codes-barres. On le retrouve également dans l'impression 3D, où sa flexibilité et son absence d'odeur le démarquent de l'acrylonitrile styrène butadiène ou de l'acide polylactique. Il a également quelques utilisations en développement pour les écrans et panneaux solaires comme substrat flexible. La figure ci-dessous reprend la répartition des applications du PET :

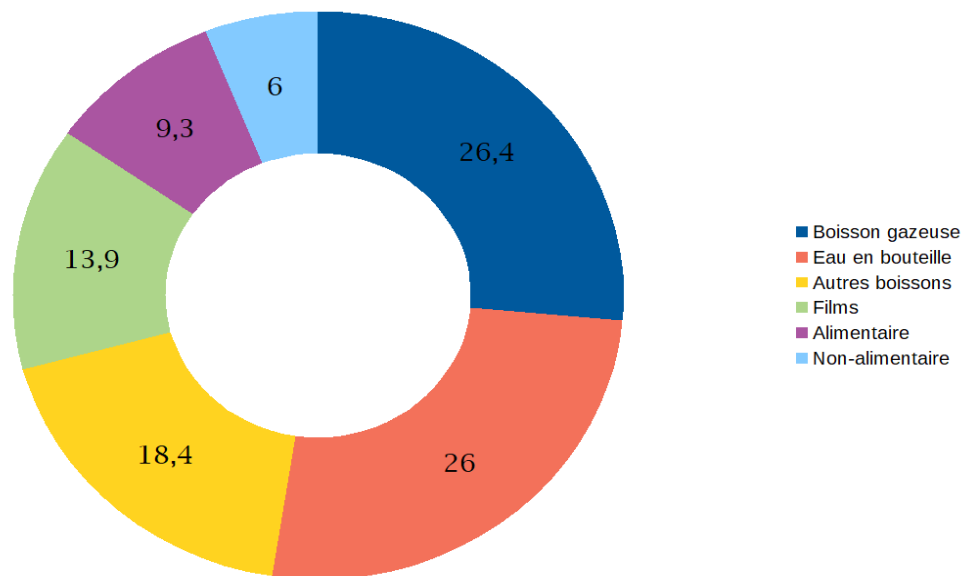


Figure 3 : Marché de la résine PET en 2015, pour une production de 20,6 millions de tonnes [Plastic Insight]

Comme le PET, le PEF peut également être utilisé pour l'emballage des aliments et des boissons ou la fabrication de fibres pour tapis et textiles. Dans l'emballage alimentaire, ses propriétés de barrière aux gaz sont meilleures que celles du PET. Elles permettent par exemple d'envisager une utilisation du PEF pour fabriquer de petites bouteilles de sodas gazeux (33 cl) et entrer en concurrence avec les cannettes en aluminium qui dominent le marché. Cependant à ce jour, le PEF n'est pas commercialisé. Seule son utilisation dans les bouteilles alimentaires connaît un fort développement.

Pour notre étude, nous ne nous intéresserons qu'à l'utilisation du PEF et du PET dans les bouteilles plastiques alimentaires.

Le poly(furanoate d'éthylène), polymère biosourcé, peut-il remplacer le poly(téréphtalate d'éthylène) ?

a) Données économiques

Le prix de la résine PET est très variable d'un pays à l'autre, avec une résine à moins de 1000\$ la tonne en Australie contre plus de 3000\$ au Canada à la fin 2017. De plus, de par son caractère pétro-sourcé, la résine est dépendante des fluctuations du prix du pétrole. Ci-dessous, la figure 4a montre les fortes fluctuations du prix de la résine en France sur l'année 2017.

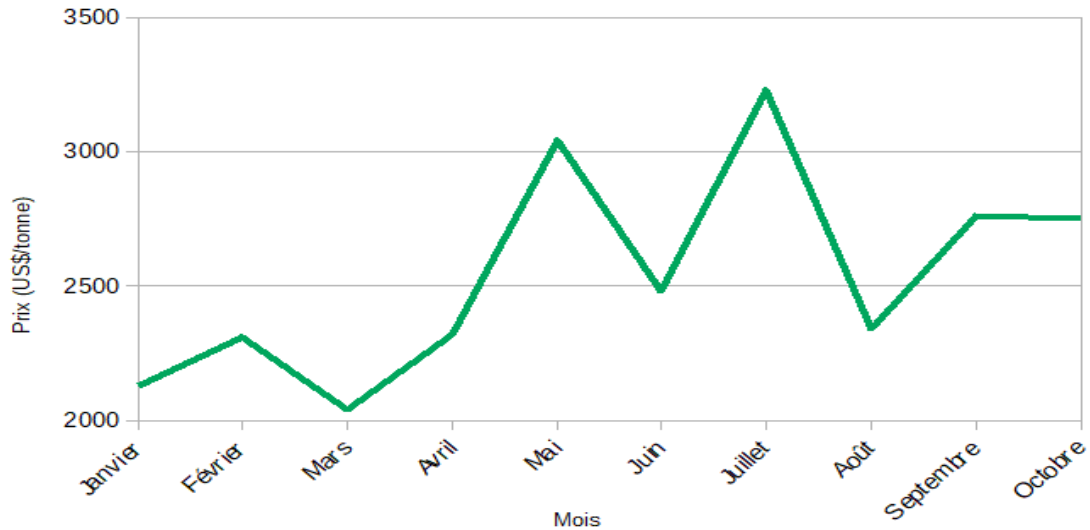


Figure 4a : Evolution du prix de la résine PET en France en 2017

Nous pouvons également observer de fortes fluctuations sur le cours du pétrole au fur et à mesure des années.

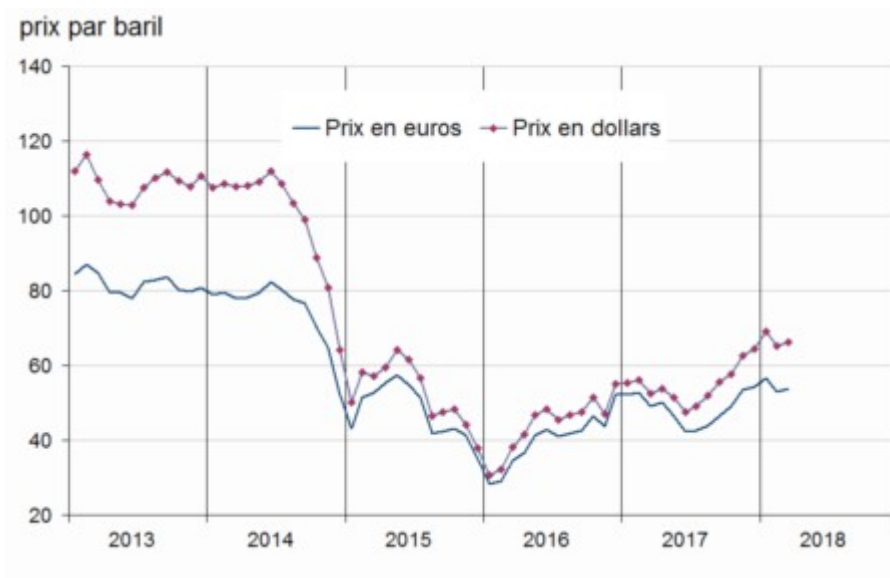


Figure 4b : Evolution du prix du pétrole de 2013 à mars 2018

Le poly(furanoate d'éthylène), polymère biosourcé, peut-il remplacer le poly(téréphtalate d'éthylène) ?

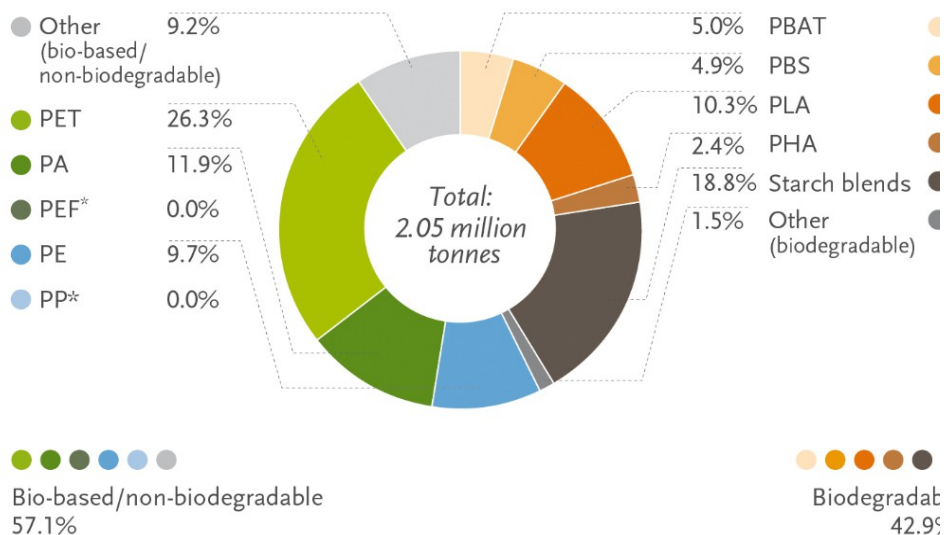
b) Données statistiques

Il existe de nombreux plastiques ce qui créer un marché important, comme on peut le voir sur la figure ci-dessous :



Figure 5 : Marché des plastiques en 2015 et 2016 [PlasticsEurope -The Facts 2017]

On peut observer une augmentation entre 2015 et 2016 de la demande en PET. On est passé de 3,4 million de tonnes environ à à peu près 3,6 million de tonnes. Certes, par rapport au total de demandes en plastiques ce n'est pas beaucoup mais le PET est utilisé que dans le packaging.



*Bio-based PP and PEF are currently in development and predicted to be available in commercial scale in 2020.

Figure 6 : Production globale des bioplastiques en 2017 [European bioplastics - nova Institute (2017)]

Le PEF devrait commencer à être commercialisé en 2020 [NaturePlast] d'où le fait qu'il soit à 0% de production en 2017.

Le poly(furanoate d'éthylène), polymère biosourcé, peut-il remplacer le poly(téréphtalate d'éthylène) ?

D) Le contexte législatif des bouteilles plastiques alimentaires

Véritable enjeu de développement économique et de développement durable, les bouteilles plastiques sont depuis leur apparition fortement réglementées, notamment sur les substances que contiennent les matériaux plastiques. Depuis peu, le recyclage occupe une place grandissante, et sa régulation se fait plus importante.

Décret n° 92-377 du 1er avril 1992 portant application pour les déchets résultant de l'abandon des emballages de la loi n° 75-633 du 15 juillet 1975 modifiée relative à l'élimination des déchets et à la récupération des matériaux.

Tout producteur est tenu de contribuer à l'élimination de l'ensemble de ses déchets d'emballage.

Règlement (CE) n° 1935/2004 du Parlement européen et du Conseil du 27 Octobre 2004 définit les exigences générales relatives aux matériaux destinés au contact alimentaire.

Le matériau doit être fabriqué dans les conditions normales selon les bonnes pratiques de fabrication. Seuls les additifs et monomères autorisés peuvent être ajoutés dans sa composition. Le matériau ne doit pas céder à la denrée des constituants dont la quantité présente un danger pour la santé humaine, entraîne une modification de la denrée, ou altère les propriétés organoleptiques. La vérification fait l'objet d'analyses réglementaires et les essais doivent avoir une validité de 5 ans. Une déclaration de conformité doit être réalisée, ainsi que la tenue d'une documentation de suivi.

Règlement (UE) N° 10/2011 de la commission du 14 janvier 2011 concernant les matériaux et objets en matière plastique destinés à entrer en contact avec des denrées alimentaires.

Seules les substances figurant sur la liste de l'Union des substances autorisées peuvent être utilisées intentionnellement dans la fabrication de couches en matière plastique de matériaux et d'objets en matière plastique.

La liste de l'Union comprend:

- les monomères et autres substances de départ;
- les additifs, à l'exclusion des colorants;
- les auxiliaires de production de polymères, à l'exclusion des solvants;
- les macromolécules obtenues par fermentation microbienne.

RÈGLEMENT (CE) N° 282/2008 de la commission du 27 mars 2008 relatif aux matériaux et aux objets en matière plastique recyclée destinés à entrer en contact avec des denrées alimentaires et modifiant le règlement (CE) n°2023/2006.

En ce qui concerne le recyclage d'emballage plastique, il est nécessaire de définir des exigences pour garantir l'aptitude du nouvel emballage au contact alimentaire.

Cependant, le traitement mécanique auquel sont soumis les matériaux à recycler pour être dépolymérisés ne change aucunement les conditions d'obtention des nouveaux produits, notamment sur les spécifications indiquées par le règlement (CE) n° 1935/2004. Ainsi seuls les monomères et additifs autorisés peuvent être ajoutés, et les limites de migration sont les mêmes.

Le poly(furanoate d'éthylène), polymère biosourcé, peut-il remplacer le poly(téréphtalate d'éthylène) ?

E) Analyse de l'impact sur le développement durable

Un enjeu majeur pour la substitution des produits issus de la pétrochimie semble être la valorisation des produits lignocellulosiques telles que les hémicelluloses ou encore la lignine. Directement extrait du bois, ces composés permettent de diminuer les coûts de fabrication.

Le PET couramment utilisé n'est pas biodégradable. Malgré le développement de plastiques biodégradables à base d'amidon de maïs, leur fabrication n'est pas moins dommageable pour l'environnement que celle du PET. Cependant, le PET est 100% recyclable, avec un coût énergétique de recyclage faible. [Fleurance nature]

Comme on peut voir sur la figure 6, le recyclage du PET suit un cycle :

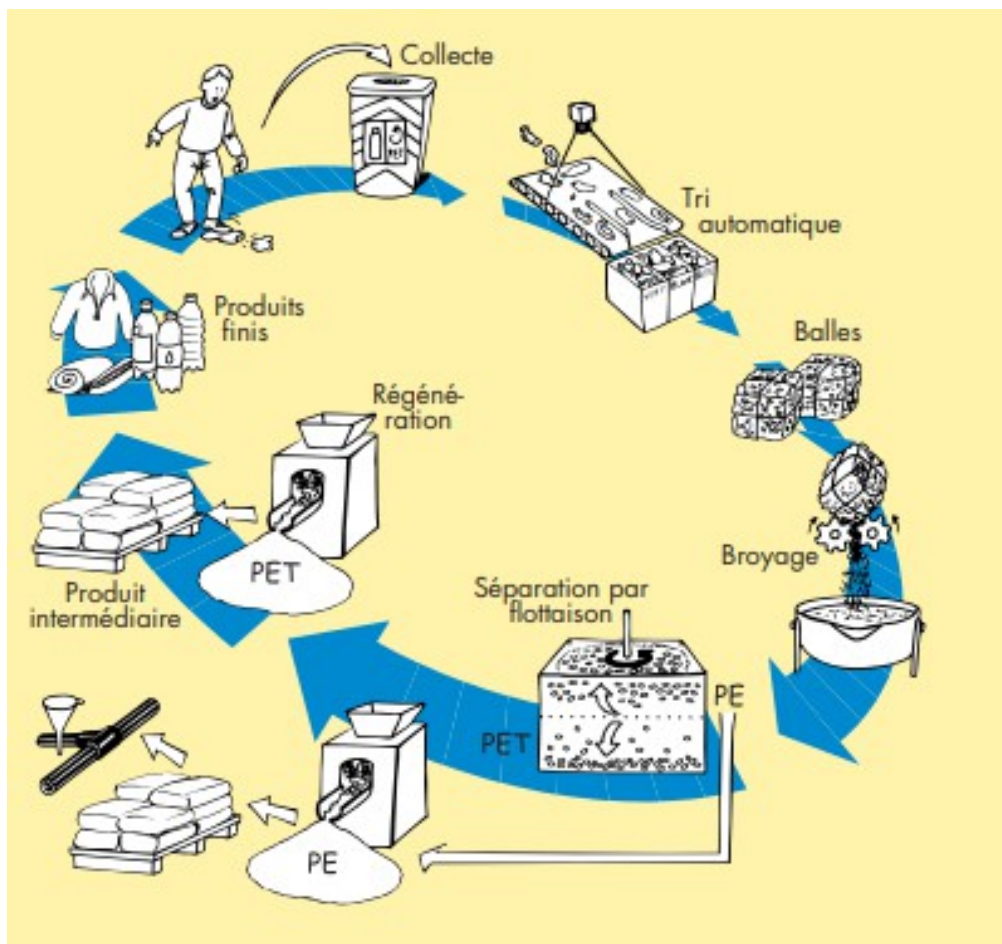


Figure 7 : Schéma du recyclage du PET

Le recyclage du PET permet de faire 60% d'économies d'énergie, lors de la fabrication d'une nouvelle bouteille, par rapport au PET neuf.

Le poly(furanoate d'éthylène), polymère biosourcé, peut-il remplacer le poly(téréphtalate d'éthylène) ?

Il y a deux façons de recycler le PET :

Recyclage mécanique : tri puis compression sous forme de balles avant réutilisation. Les propriétés du PET sont maintenues ou reconstituées, le polymère est réutilisable 3 à 4 fois.

Recyclage chimique : recyclage vers les matières initiales par méthanolyse, hydrolyse et saponification avec recyclage intégral et indéfini du PET.

Le PET est actuellement le matériau le plus écologique dans le cadre de conditionnement de produits liquides. [Fleurance nature] En 2009, 1,4 million de tonnes de bouteilles en PET ont été collectés en Europe, soit +8% par rapport à 2008 ce qui donne un taux de collecte à 48,4%. L'Europe a pour objectif d'accroître le taux de moyen de recyclage des plastiques à 22,5%. Elle devrait donc pouvoir amener sa capacité de collecte et de recyclage des bouteilles en PET à 1,6 million de tonnes par an. [Planétoscope, 2018]

II- Les principales solutions techniques actuelles

Cette partie vise à étudier de manière détaillée les procédés de fabrication du PET, du PEF et des bouteilles plastiques. Cela nous amènera ensuite à une comparaison des procédés, ainsi qu'à dresser une vue d'ensemble des perspectives techniques.

A. Production de PET

Lors de la seconde guerre mondiale, la production de nylon devient compliquée. Les industriels doivent alors trouver un substitut. Le développement du PET a permis de répondre à cet enjeu, en proposant un matériau utilisable de manières très diverses et aux caractéristiques inégalées. Ainsi, depuis les années 1970, le PET connaît un vaste succès et est rapidement devenu incontournable.

a) La fabrication du PET par étapes

● Principe de la polycondensation

L'obtention du PET se fait par polycondensation. Le principe de la polycondensation est d'effectuer une polymérisation par étape. A chacune de ces étapes, deux monomères présentant deux centres actifs de part et d'autre de leurs structures réagissent ensemble selon une réaction de condensation, afin de former des dimères, puis des oligomères de plus en plus long, pour enfin arriver à des polymères. La condensation est une réaction chimique correspondant au mariage de deux molécules, ou de deux parties de molécules, amenant à la formation d'un condensat, le polymère, par élimination d'une petite molécule. En général, la petite molécule est de l'eau.

● Polycondensation du PET à partir d'éthylène glycol et d'acide téréphtalique

La matière première utilisée pour la fabrication du PET est le pétrole. Il faut environ 1.9 kg de pétrole brut pour obtenir 1 kg de PET. Les molécules intervenant lors de la polycondensation sont l'éthylène glycol (EG) et l'acide téréphtalique (TPA). Ces molécules sont issues de la pétrochimie. Elles peuvent donc directement être achetées aux raffineurs par les usines fabriquant le PET.

A l'échelle industrielle, l'obtention du PET se fait selon les étapes suivantes:

- La préparation des matières premières.
- L'estérification ou bien parfois la transestérification.
- La pré-polycondensation.
- La polycondensation.

Le schéma ci-dessous illustre les étapes de préparation du PET :

Le poly(furanoate d'éthylène), polymère biosourcé, peut-il remplacer le poly(téréphtalate d'éthylène) ?

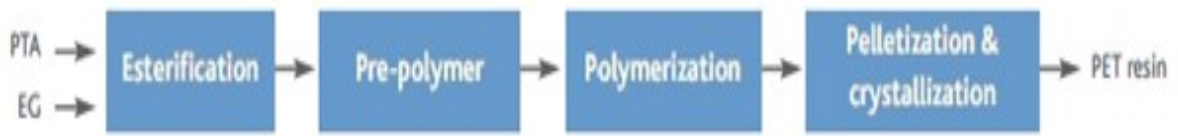


Figure 8 : Fabrication du PET [Guichon valves, 2018]

Le TPA est mélangé avec l'EG et un catalyseur puis on introduit le mélange au sein du système d'estérification, via un système de pompage. La polycondensation est, dans le cadre de l'obtention du PET, une réaction d'estérification. Cette réaction est schématisée ci-dessous :

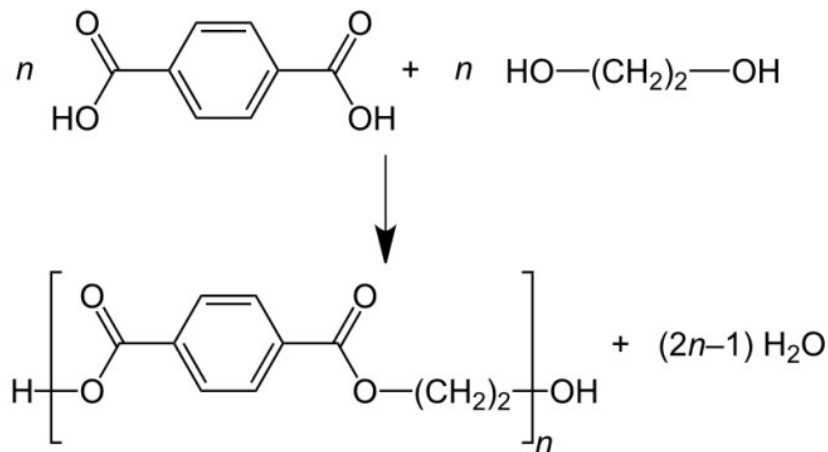


Figure 9 : Polycondensation du PET [Wordpress]

L'estérification se fait à la pression atmosphérique et l'eau formée est progressivement éliminée. Le mécanisme de cette estérification peut être explicité comme suit : l'atome d'oxygène de la fonction alcool de la molécule d'éthylène glycol porte une charge partielle négative. Or l'atome de carbone de la fonction acide du TPA porte lui une charge partielle positive. Ainsi, l'atome d'oxygène vient attaquer l'atome de carbone, et il y a formation d'une liaison covalente entre les deux atomes. L'atome de carbone ne pouvant excéder quatre liaisons, le groupement hydroxyle du TPA se sépare du reste de la molécule et se marie avec l'atome d'hydrogène de l'oxygène attaquant, pour se stabiliser. Il y a alors formation d'une molécule d'eau et d'une liaison ester entre l'EG et le TPA.

Ensuite, le produit dimère obtenu est envoyé à l'étape de pré-polymérisation ou pré-polycondensation. Cette étape se réalise sous vide. A cette étape, les dimères formés précédemment condensent ensemble pour former une chaîne un peu plus longue, comme des trimères ou des oligomères.

Les conditions de température et de temps imposées lors de l'estérification et de la pré-

Le poly(furanoate d'éthylène), polymère biosourcé, peut-il remplacer le poly(téréphtalate d'éthylène) ?

condensation sont décrites ci-dessous :

❖ L'estérification :

Le mélange est chauffé jusqu'à 170°C et le plateau est maintenu pendant environ une heure.

❖ La pré-condensation:

La température du mélange est encore élevée jusqu'à 180°C pendant une heure environ. Et une autre augmentation en température est mise en place jusqu'à 185°C pendant une heure.

Ensuite, les produits issus de la pré-polycondensation entrent au sein de l'unité de polycondensation finale. Cette étape est conduite à une pression de 2,7 à 5,5 bars et à une température de 220 à 260°C, pendant cinq heures. Cette étape a vocation d'unir les chaînes formées à l'étape précédente entre elles, afin de former des polymères de longues chaînes. Enfin, la température est abaissée jusqu'à 90°C pendant 45 min ce qui permet de faire disparaître les réactifs.

A l'issue de cette dernière étape, le PET est obtenu sous forme fondue. Elle peut être alors mise en forme selon son futur domaine d'application. On peut ainsi trouver le PET sous forme de filaments ou bien de copeaux solides. Dans le domaine des bouteilles, on choisira d'utiliser des copeaux solides, que l'on nommera résine.

Maintenant que les étapes chimiques ainsi que les conditions associées ont été vues, il est intéressant d'étudier comment l'agencement des réacteurs industriels, accueillant chacune de ces étapes, est réalisé.

Pour se faire, un focus sera donné sur la technologie Eastman IntegRex, dont l'équipement principal est un réacteur tubulaire. Cette technologie permet de réduire la consommation en énergie, en matière première et en coût opérationnel. C'est actuellement la technologie la plus répandue. [Guichon valves, 2018] Cette technologie est schématisée ci-après :

Le poly(furanoate d'éthylène), polymère biosourcé, peut-il remplacer le poly(téréphtalate d'éthylène) ?

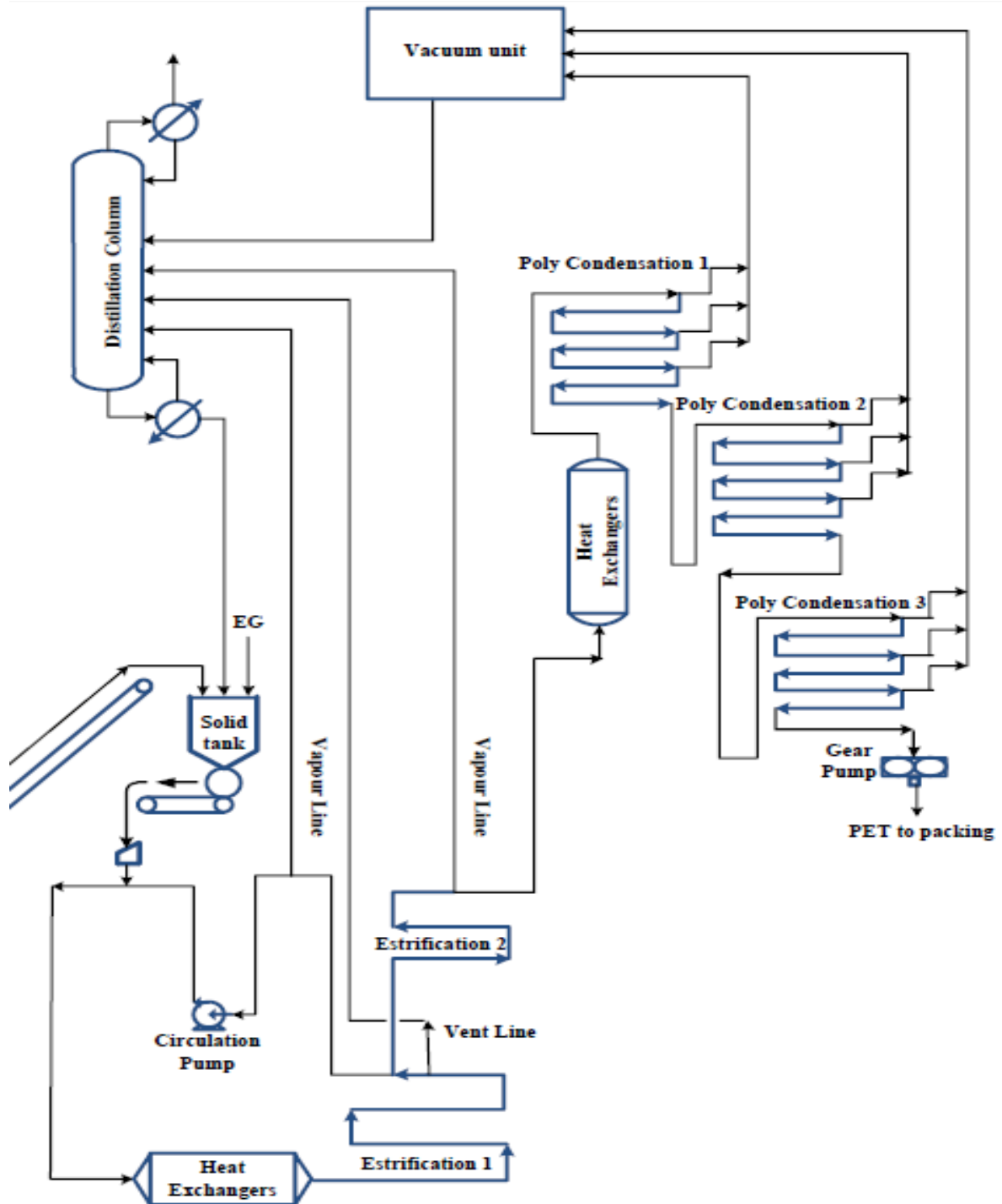


Figure 10.: Équipement de synthèse du PET [Guichon valves, 2018]

Ce schéma montre un système de vis sans fin amenant le TPA, sous forme solide, au sein d'un cuvier dans lequel est ajouté l'EG. Le mélange obtenu est alors chauffé grâce à l'adjonction de vapeur. Ensuite, la réaction d'estérification se produit en deux étapes à la suite desquelles les vapeurs sont récupérées. Une partie de ces vapeurs est ajoutée à la préparation avant son entrée dans l'échangeur, et le reste est amené vers une tour de distillation afin qu'une partie de l'EG soit récupérée par séparation et réintroduit à l'entrée du procédé. Après les étapes d'estérification, la température du mélange augmente via la

Le poly(furanoate d'éthylène), polymère biosourcé, peut-il remplacer le poly(téréphtalate d'éthylène) ?

traversée d'un second échangeur. La polycondensation prend ensuite place en trois étapes. Ces étapes sont reliées à un système de vide afin que les vapeurs dégagées soient récupérées et acheminées vers la tour de distillation. A l'issue de la polycondensation, le PET sous forme liquide peut être mise en forme de manière primaire.

Bien que cette technologie soit très répandue, elle compte deux étapes d'estérification et trois étapes de polycondensation. Cette technologie, comme les nombreuses autres existantes, tendent à construire un système diminuant le nombre d'étapes nécessaires.

Ainsi la production du PET se fait selon un système bien rodé qui a été progressivement amélioré et qui fonctionne de manière efficace. Intéressons nous à la deuxième solution technologique de production de PET.

● Polycondensation du PET à partir d'éthylène glycol et diméthyltéréphtalate

Le PET peut également être obtenu à partir d'EG et de diméthyltéréphtalate (DMT) selon une réaction de transestérification. En effet, le DMT est un ester qui via cette réaction donne un nouvel ester. Cette réaction est schématisée ci-dessous:

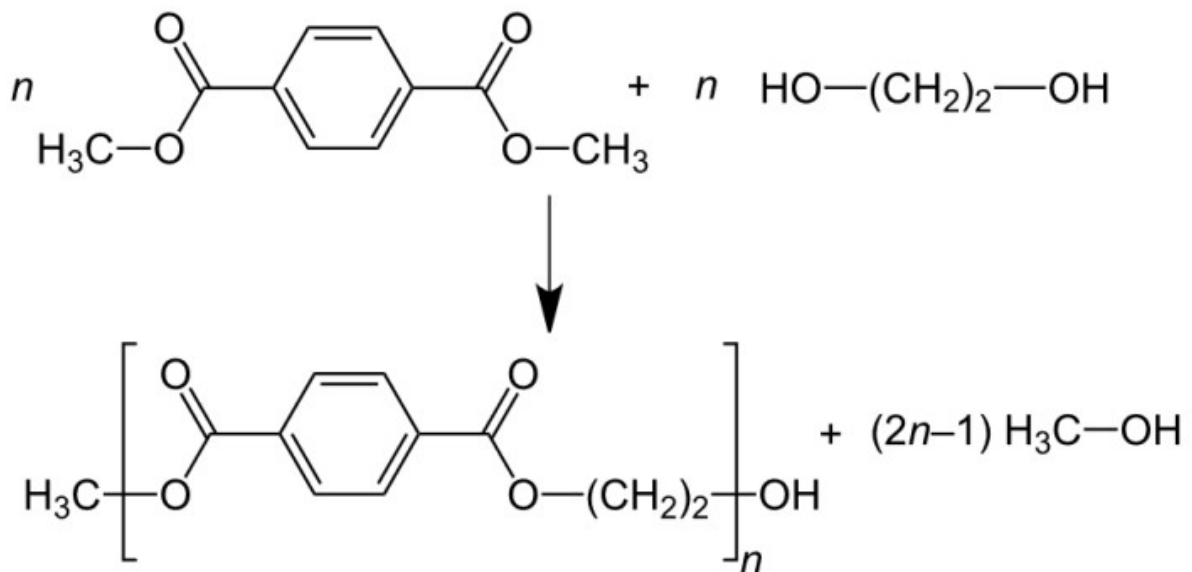


Figure 11 : Réaction de polyestérification du PET [Ramène ta science, 2018]

Le mécanisme chimique expliqué précédemment s'adapte à cette réaction. La seule différence entre les deux procédés, réside dans le produit éliminé. En effet, lors de la réaction d'estérification, de l'eau était éliminée, alors que lors de la réaction de transestérification, du méthanol est éliminé. Le méthanol est un produit toxique donc sa production suppose une usine respectant les normes relatives à l'utilisation de ce produit mais cela est parfois compliqué. C'est pourquoi la large majorité des usines de production de PET utilisent la réaction d'estérification.

Le poly(furanoate d'éthylène), polymère biosourcé, peut-il remplacer le poly(téréphtalate d'éthylène) ?

b) La production de PET dans le monde

Le tableau suivant synthétise les principaux fabricants de PET ainsi que leur volume de production.

Fabricants de PET	Produit et tonnage	Localisation
Indorama Ventures	Résine PET 4,2 Mt en 2017	Thaïlande (siège), USA, Lituanie, Chine, Indonésie, Pologne...etc
CPME: consortium d'entreprises de Grande Bretagne, Allemagne, Grèce, Italie, Lituanie...etc	Résine PET 3 Mt en 2017	Belgique, Pays-bas, Espagne, Portugal, Pologne
M&G Chemical	Résine PET 2,7 Mt en 2017	USA (siège)
PetroChina Group	Résine PET 2,5 Mt en 2017	Shanghai & Hainan
Sang Fang Xiang	Résine PET 2,1 Mt en 2017	Chine (siège)
DAK America	Résine PET 1,8 Mt	USA
Eastman Chemical Company	PET pour l'emballage	USA
NEO Group	300 kt/an de NEOPET pour 300 clients	Lituanie

Tableau 3 : Principaux fabricants de PET

Ce tableau montre que la fabrication du PET se fait au sein de nombreux pays et à un tonnage important. En effet, le PET est devenu un matériau indispensable et cela dans plusieurs domaines. Voilà, pourquoi le nombre d'entreprises produisant ce plastique, dans le monde, a une répartition géographique assez équilibrée comme en témoigne le graphique ci-après.

Le poly(furanoate d'éthylène), polymère biosourcé, peut-il remplacer le poly(téréphtalate d'éthylène) ?

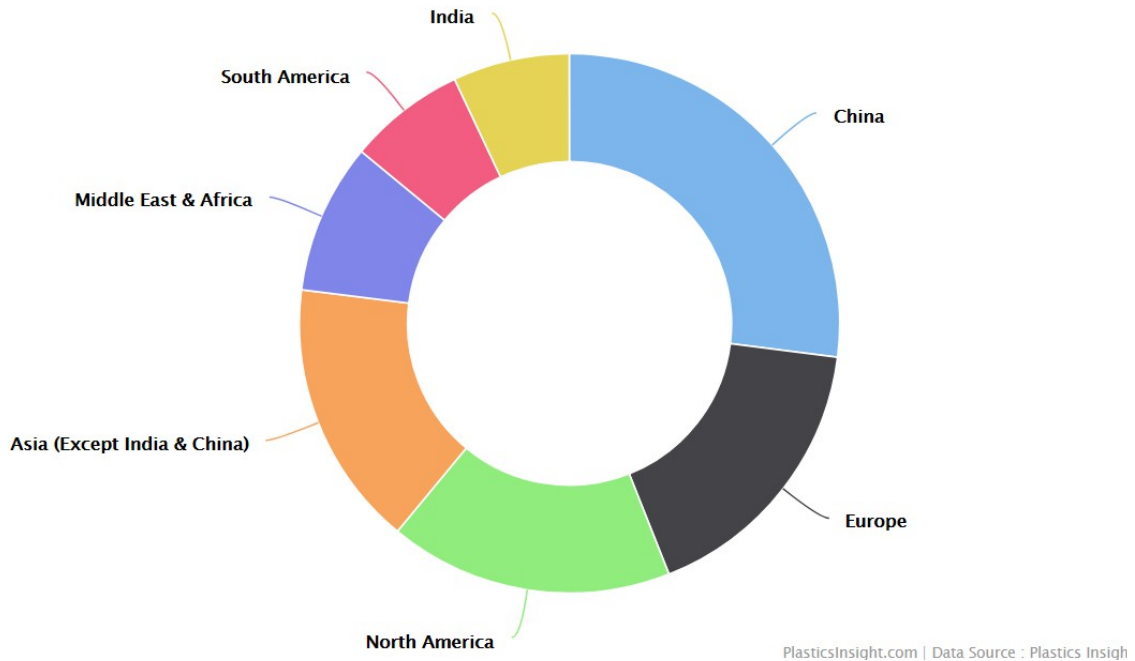


Figure 12: Capacité de production globale de PET [Plastic Insight]

On peut voir que la Chine possède plus du quart de la production mondiale de PET, ce qui tient en partie au fait que ce pays était jusqu'à peu l'usine du monde, et que la population consomme de plus en plus d'eau en bouteille.

c) Les facteurs limitants

Comme il l'a été montré précédemment, le PET a connu un fabuleux succès depuis sa création en 1941. Cette croissance permanente s'explique par ses caractéristiques physiques et par une fabrication très efficace et facile à mettre en place.

Cependant, le PET rencontre actuellement quelques difficultés, avec différents facteurs limitant actuellement sa production :

- la réglementation : ce polymère étant issu de ressources fossiles, la réglementation en terme de développement durable envers les industriels se durcit petit à petit.
- les importantes variations de prix : même s'il est toujours possible d'utiliser des ressources non-renouvelables, ces dernières sont instables en terme de prix. Cela joue et jouera dans les années à venir en défaveur des produits pétrochimiques.
- l'image marketing négative : enfin, du fait de ses origines pétrolières, le PET ne jouit plus tellement d'une aussi belle image que dans le passé auprès des consommateurs. Ces derniers préfèrent de plus en plus se tourner vers des emballages biosourcés et respectueux de l'environnement.

L'ensemble de ces facteurs limitants tend à fragiliser l'expansion du PET et menace sa future production.

Le poly(furanoate d'éthylène), polymère biosourcé, peut-il remplacer le poly(téréphtalate d'éthylène) ?

B. Production de PEF

a) La fabrication du PEF par étapes

Cette partie retrace les étapes de la fabrication du PEF, depuis les matières premières utilisées jusqu'à sa mise en forme.

- **Principe du procédé :**

Le principe du procédé peut être illustré par le schéma ci-dessous:

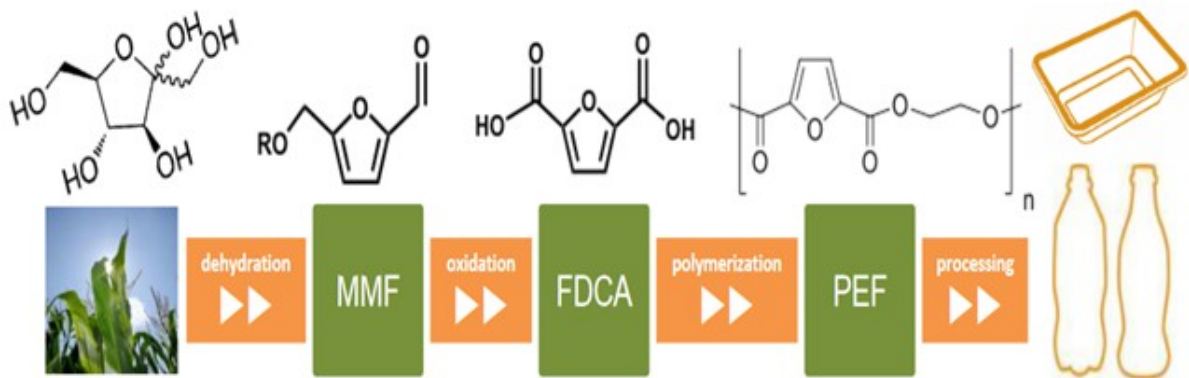


Figure 13: Procédé de synthèse du PEF [Avantium (Gruter Gert-Jan), 2015]

Le procédé utilise comme matière première le fructose, un sucre issu de la biomasse végétale. Le fructose subit une déshydratation chimique qui le transforme en MMF, puis une oxydation le transforme en FDCA. Ce dernier est un diacide qui subit alors une polycondensation avec du di-éthanol biosourcé (bioMEG). Ce procédé est chimiquement catalysé. Une fois le polymère formé, il peut subir les procédés de mise en forme des polymères et être utilisé comme le PET pour la réalisation d'objets en plastique.

- **La matière première utilisée :**

Actuellement c'est à partir de fructose, et non à partir de déchets végétaux, que le procédé Avantium fabrique le PEF. En effet le fructose est particulièrement adapté à ce procédé car il donne de meilleur rendement que le glucose. Ainsi, pour le moment, le fructose est acheté à des usines fabriquant des sucres, la valorisation de la biomasse en sucres étant encore en développement.

Le poly(furanoate d'éthylène), polymère biosourcé, peut-il remplacer le poly(téréphtalate d'éthylène) ?

- **La déshydratation du fructose obtenue en vue d'obtenir le RMF ou la première molécule étape:**

Le schéma ci-dessous illustre la déshydratation et l'estérification du fructose en RMF:

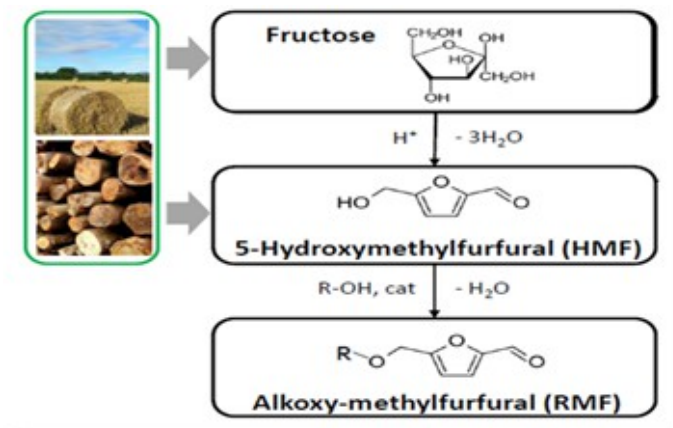


Figure 14 : Synthèse du RMF [Gotro, 2013]

Le fructose subit une déshydratation catalysée en milieu acide, qui amène au 5-hydroxyméthylfurfural. Une estérification le transforme ensuite en RMF. Ce qui différencie le HMF du RMF est le groupement alkyl de RMF qui remplace un H de HMF. Ce groupement alkyl rend le RMF plus stable que son homologue.

L'estérification prend directement place après la déshydratation, donc au sein du même système chimique. Les conditions de réalisation de ces deux réactions sont les suivantes :

- Sous-produit de l'estérification : l'acide lévulinique
- Cinétique de la réaction de déshydratation et d'estérification: Premier ordre
- Solvant de la réaction : Alcool
- Température 240°C
- Catalyseur acide
- pH=2-4

Cette réaction ne présente pas un rendement très élevé. C'est pourquoi de nombreuses solutions ont été développées :

- Utiliser des solvants aprotiques
- Extraction in-situ du HMF avant réaction
- Mise en place de système biphasique

D'après le procédé d'Avantium, le RMF réagit pour donner le FDCA. Cependant nos recherches ont abouti à la transformation de HMF en FDCA et non à la transformation de RMF en FDCA. Il est pourtant plus aisé de réaliser du FDCA à partir de RMF dans le cadre du procédé d'Avantium, car c'est une molécule plus stable que HMF. En effet, la molécule HMF disparaît rapidement en se transformant en RMF. Cependant, nous n'avons pas pu récolter d'informations sur ce point, il est possible que ce soit de l'ordre du secret industriel. En effet, la production de FDCA à partir d'une molécule stable fait l'objet de nombreuses recherches et est un point critique du procédé YXY d'Avantium.

Le poly(furanoate d'éthylène), polymère biosourcé, peut-il remplacer le poly(téréphtalate d'éthylène) ?

Afin de poursuivre l'explication du procédé d'Avantium, l'étape d'oxydation du HMF en FDCA est proposée, ci-dessous, à titre de remplacement de la transformation de RMF en FDCA.

- **L'oxydation du HMF pour obtenir le FDCA ou la seconde molécule étape:**

Le FDCA est principalement obtenu par oxydation catalytique sélective du HMF en passant par plusieurs intermédiaires comme décrit ci-dessous:

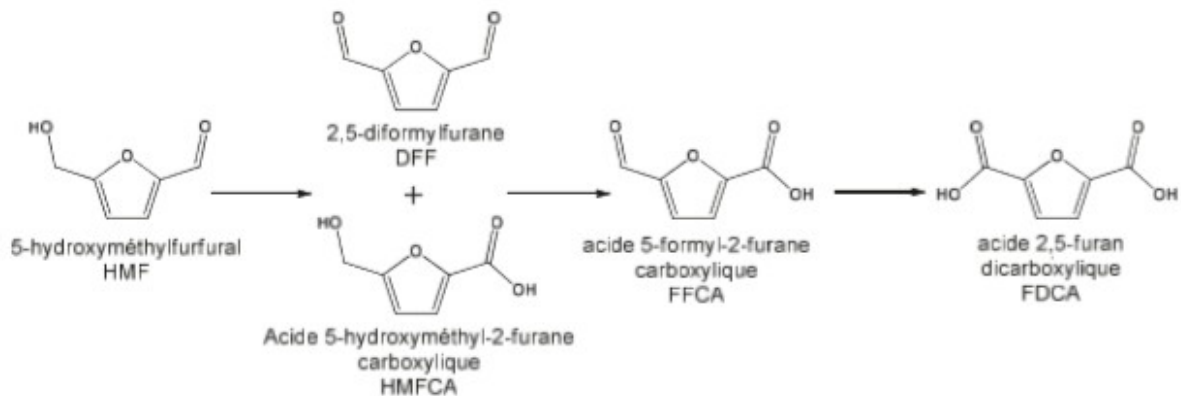


Figure 15 : Schéma réactionnel de l'oxydation du HMF [HichamAitRass, 2014]

Cette réaction d'oxydation sélective est basée sur l'action de l'oxygène moléculaire sur le HMF. Elle est constamment catalysée. Il existe la catalyse homogène et celle hétérogène.

- ❖ **Catalyse homogène :** elle se fait en présence de sels de métaux solubles (Co, Mn, Br). La réaction a lieu en milieu acide, et est réalisée sur des supports organiques (charbon actif) ou inorganiques (oxydes, oxydes mixtes).

Le principal intérêt est le rendement puisque celui-ci est de l'ordre de 80%.

- ❖ **Catalyse hétérogène :** elle se fait à partir de catalyseurs à base de métaux nobles supportés tels que le Pt, le Pd, le Au ou encore le R, en phase aqueuse alcaline.

Afin de récupérer le FDCA, une étape de cristallisation est nécessaire (par acidification du milieu jusqu'à pH<2).

- **La polymérisation:**

La polymérisation du FDCA avec l'EG peut être illustrée, par le schéma, ci-dessous:

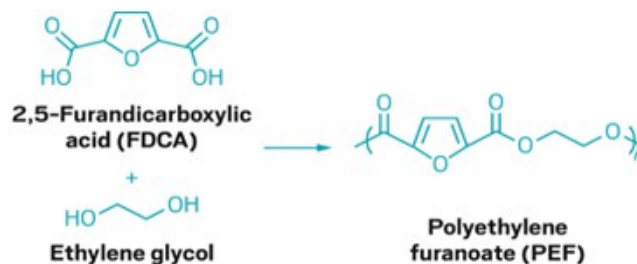


Figure 16 : Synthèse du PEF [Saywell,2018]

Le poly(furanoate d'éthylène), polymère biosourcé, peut-il remplacer le poly(téréphtalate d'éthylène) ?

L'EG utilisé lors de cette réaction est issue de la fermentation de sucres et non de ressources pétrolières.

Le processus de polymérisation est quant à lui illustré par le schéma ci-dessous:

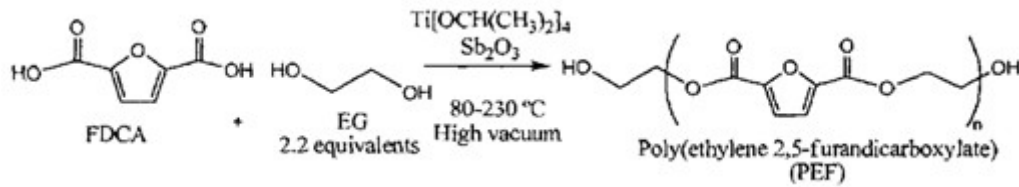


Figure 17 : Synthèse du PEF et conditions opératoires [Saywell, 2018]

Les conditions de la réaction de polymérisation du PEF sont semblables à celles du PET. Cependant quelques paramètres devraient être ajustés tels que la nature des catalyseurs.

Les étapes de cette polymérisation ainsi que les conditions associées sont identiques à la polymérisation du PET, présentée précédemment. [Ramène ta science, 2017]

b) La production de PEF dans le monde

Actuellement, l'entreprise Avantium, société néerlandaise spécialisée dans les solutions chimiques renouvelables, est la plus avancée dans ses recherches sur le PEF. Son partenariat avec BASF a conduit à la création de Synvina, une coentreprise destinée à la production de PEF à partir du procédé (YXY, PEF) destiné à la commercialisation de bouteilles pour Coca-Cola, Danone, ou Alpla. Synvina a annoncé la construction d'une future usine de démonstration à Anvers, en Belgique. Pour cela, Synvina s'appuie sur des projets existants d'Avantium : Mekong technology, qui produit du bio-MEG, et Zambezi technology, qui produit du glucose 2G. Synvina est chargée de produire le FDCA puis de fabriquer les granulés de PEF. [Avantium (Gruter Gert-Jan), 2015]

L'entreprise japonaise Toyobo a également annoncé un partenariat avec Avantium pour la polymérisation de PEF pour le développement de films utilisés dans l'emballage alimentaire ainsi que de bouteilles alimentaires, ou l'électronique avec les écrans ou panneaux solaires.

Une autre entreprise japonaise, Mitsui, encore une fois en partenariat avec Avantium, a annoncé vouloir développer des films minces et des bouteilles alimentaires en PEF, qui verraient le jour pour les jeux olympiques 2020. [Bio-based world news] [Latieule, 2016 et 2017]

Ces dernières années, d'autres entreprises ont déposé un brevet sur le PEF : Procter&Gamble, Canon, Dupont de Nemours, Novamont, Furanix technologies, Evian eaux minérales, Torat industries, Inovia Films, Eastman chemical... ce qui montre l'intérêt des industriels pour ce plastique. Cependant à ce jour la commercialisation à grande échelle n'est pas lancée.

Le poly(furanoate d'éthylène), polymère biosourcé, peut-il remplacer le poly(téréphtalate d'éthylène) ?

Un laboratoire taiwanais, le Industrial Technology Research Institute (ITRI), travaille également au développement du PEF pour les entreprises asiatiques, avec pour objectif de relier tous les acteurs de la chaîne afin de promouvoir l'utilisation du PEF et de repenser l'industrie taiwanaise du polyester. [ITRI, 2018]

c) Les facteurs limitants

● Un procédé "fragile" - facteur interne au procédé

Le concept du PEF a tout pour plaire. Il devrait donc voir sa croissance augmenter fortement, à condition que le procédé soit maîtrisé, ainsi que son coût. En effet, au cours de la fabrication du PEF, l'obtention de RMF et le passage du RMF au FDCA représentent des étapes instables. Cela engendre des rendements faibles et donc un coût de production trop élevé pour pouvoir être commercialisé. La production de PEF n'a pas encore fait ses preuves et son coût de production est le principal facteur limitant son développement.

● Des concurrents nombreux - facteur externe au procédé

Nombreux sont les produits émergents autres que le PEF. Ces derniers sont de potentiels concurrents du PEF, et représentent donc un frein à la démocratisation du PEF. Parmi ses concurrents, le bioPET, le PLA ainsi que les Vegan Bottles en sont les principaux.

❖ Bouteilles en Bio-PET

Le bio-PET est l'équivalent du PET, mais partiellement d'origine végétale. En effet, l'éthylène glycol servant à la production de PET peut être issu de la canne à sucre. Ainsi la composition chimique reste la même tout en intégrant une partie de matériau issu du végétal. L'utilisation de cette technologie permet de réduire l'empreinte carbone de 30 à 40% par rapport à une bouteille en PET entièrement pétro-sourcée.

Coca-Cola est la première société à avoir adoptée l'emballage en bio-PET, qu'elle a nommée Plant-Bottle™. Ces bouteilles sont déjà largement utilisées pour différentes marques, avec près de 15 milliards d'emballages Plant-Bottle™ distribués dans 25 pays. Ainsi en 2016 le bio-PET représentait un marché de 2,14 milliards d'euros, et devrait croître de plus de 11% d'ici à 2025 [Market Research Explore, 04.04.2018] mais coûtent 30 à 40% plus cher que les bouteilles en PET classique [Sidel].

Suite au succès de la PlantBottle, Coca-Cola s'est associé à d'autres grands fabricants, For Motor Company, H.J. Heinz Company, Nike, Procter & Gamble, pour créer le Plant PET Technology Collaborative. Ce groupe de travail vise à développer l'utilisation de matériaux 100% végétaux et de trouver des alternatives aux ressources fossiles.

D'autres industriels, comme Danone et Nestlé Waters, ont pour projet de passer au PET biosourcé à 95% d'ici 2025. [Ermenier Karine, 2017]

Le poly(furanoate d'éthylène), polymère biosourcé, peut-il remplacer le poly(téréphtalate d'éthylène) ?

De plus, l'utilisation du PET biosourcé offre un gain de 50% d'énergie en industrie, ce qui permet de réduire considérablement la production de gaz à effet de serre. Le PET est le matériau le plus recyclé au monde et est réutilisé plusieurs fois, ce qui augure un cycle d'économie circulaire [Eau minérale naturelle]. Or, la croissance du PET biosourcé devraient être ralentie au profit du PEF [Nature Plast].

❖ Bouteilles en PLA

Récemment sont apparues sur le marché les bouteilles en acide polylactique, ou PLA. Le PLA est obtenu à partir d'amidon, via fermentation des sucres ou synthèse de l'acide lactique par des bactéries, puis polycondensation de l'acide lactique ou polymérisation par ouverture de cycle du lactide.

Seul le corps de la bouteille est réalisé en PLA, et le bouchon est réalisé en polyéthylène biosourcé, un matériau biodégradable mais non compostable, obtenu à partir de canne à sucre. Bien que le PLA soit compostable, les bouteilles faites en PLA ne sont pas destinées à être compostées du fait de leur forte épaisseur. Cependant l'origine 100% végétale de ces bouteilles en font un élément marketing important pour contenir des jus ou smoothies. [BioFutura]

Cependant, PETCore Europe, association basée à Bruxelles de 27 entreprises représentant la filière PET, a commandé une étude portant sur l'impact du PLA sur les filières de recyclage du PET, réalisé par l'entreprise indépendante PTI-Europe. Il est apparu que la présence de 0,1% de PLA dans la filière PET (soit une bouteille sur 1000), pouvait dégrader la qualité des résines PET recyclées. En effet, il semblerait que le PLA ne résiste pas aux conditions thermiques imposées par les procédés de mise en forme du PET. Le recyclage du PET concernant 40 milliards de bouteille en Europe chaque année, soit un million de tonnes. L'étude met donc en évidence la nécessité d'orienter correctement le tri vers les filières adéquates, mais aussi d'informer les consommateurs, et donc de mettre à niveau les filières de valorisation.

❖ Vegan bottles

L'entreprise Lys Packaging, basée en Charentes-Maritimes, a développée une bouteille issu de la bagasse de canne à sucre et de combinaisons du végétal. Cette technologie nouvellement brevetée utilise la transformation des sucres extraits pour donner un produit biodégradable et compostable : la VeganBottle®. Bouteilles, bouchons et étiquettes sont fabriqués dans des matériaux respectant la norme EN13432 de biodégradabilité et compostabilité, et peuvent être valorisés comme bio-déchets en fin de vie. [Vegan Bottle™]

En 2017, l'entreprise a produit 2 millions de bouteilles, majoritairement destinées à des magasins bio, pour un chiffre d'affaires de 600 000 euros. [France bleu]

C. Comparaison des procédés du PET et du PEF

Il existe un parallèle certain entre le PEF et le PET. En effet, la production du PET comme celle du PEF nécessite la polycondensation de deux composés : EG et TPA dans un cas, EG et FDCA dans l'autre. En d'autres termes, le FDCA est au PEF ce qu'est le TPA au PET. Or, le FDCA est une molécule chimique très compliquée à synthétiser, et en même temps très convoitée dans le domaine des polymères biosourcés. A contrario, le TPA est une molécule classique bien connue, issue de la pétrochimie. Il y a donc en ces deux molécules un premier point de comparaison intéressant : l'essence de la concurrence entre le PEF et le PET tient à la production de FDCA.

Le second parallèle, cette fois-ci beaucoup plus étroit, réside en la mise en oeuvre de la polymérisation. En effet, dès lors que les molécules chimiques de départ sont disponibles, les équipements tout comme les paramètres de réglage sont identiques pour la production des deux produits.

Enfin, la production du PET est bien connue et a été améliorée tout au long de sa production. De l'autre côté, la production de PEF n'est pas encore lancée commercialement. Seul son développement à grande échelle lui permettra de faire ses preuves. Pour cela, le PEF peut compter sur le soutien de grands groupes : l'entreprise Coca-Cola, qui produit 580 000 millions de tonnes de bouteilles par an, a signé un accord avec Avantium pour le lancement de l'unité pilote de PEF.

D. Production de bouteilles plastiques

Les premières bouteilles plastiques sont apparues en 1960, et utilisaient le polychlorure de vinyle (PVC), un thermoplastique pétro-sourcé. Cependant, son radical chlore se transforme en acide chlorhydrique lors de la combustion, un composé nocif et donc controversé. En 1992, le PET commence à remplacer le PVC, à la fois pour son procédé moins toxique, mais aussi le gain de légèreté apporté, et devient en quelques années le plastique le plus utilisé dans les bouteilles plastiques alimentaires, comme en témoigne le graphique suivant :

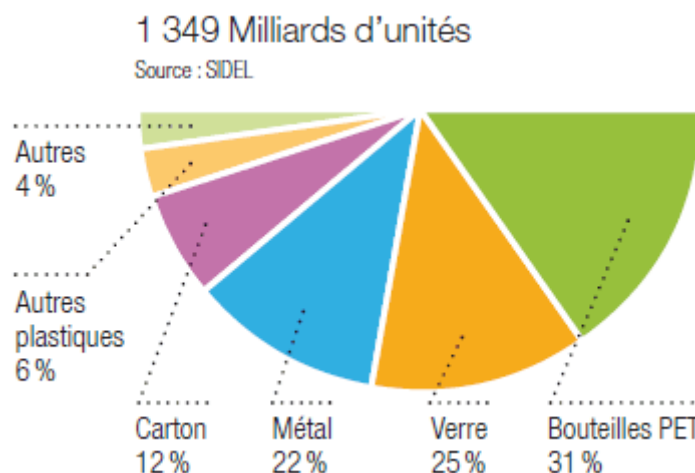


Figure 18: Répartition des emballages bouteilles en 2010 [Elipso - Cerig Pagora]

Le poly(furanoate d'éthylène), polymère biosourcé, peut-il remplacer le poly(téréphtalate d'éthylène) ?

Cependant, l'impact environnemental étant de plus en plus présent dans les exigences des consommateurs et de la législation, certains industriels tendent à imaginer une nouvelle répartition progressive des matières premières, comme en témoigne la figure ci-dessous.

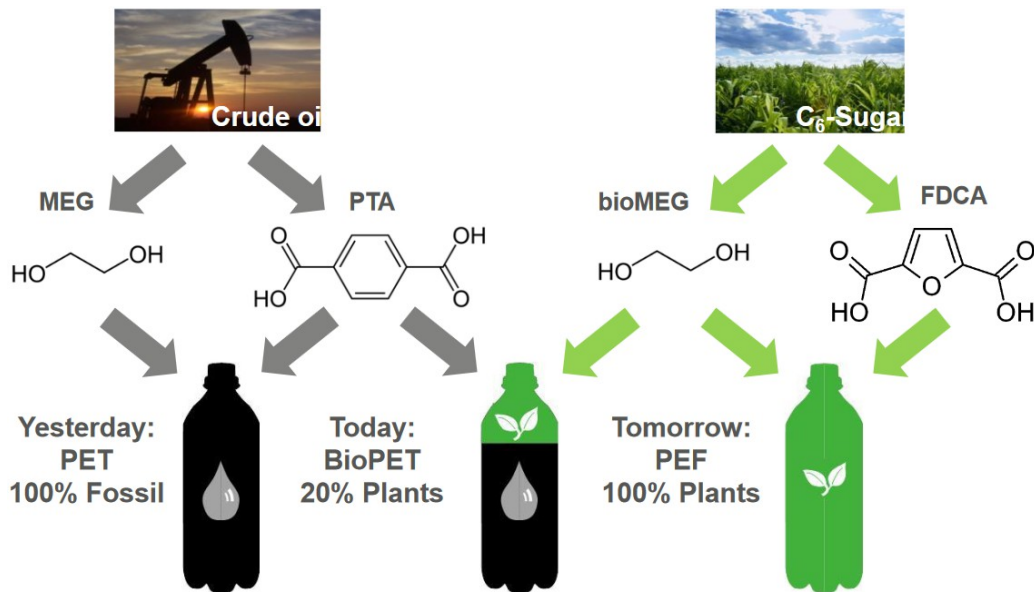


Figure 19 : Principales voies de synthèse des bouteilles plastiques [Gotro, 2013]

Pour certains industriels, l'idéal serait ainsi de passer du PET à un bio-PET avant le PEF.

Ce graphique n'exclut cependant pas l'utilisation de d'autres plastiques, comme :

- le polyéthylène basse densité (PEHD) pour des bouteilles opaques
- le polypropylène (PP)
- le polycarbonate (PC) utilisé pour les biberons
- l'acide polylactique (PLA) conduisant à des matériaux compostables [Cerig Pagora] [Colisson Pascale, 2017]

- **Procédé de fabrication :**

Les bouteilles plastiques alimentaires sont produites par moulage-injection.

La première étape de fabrication est le moulage par injection de la préforme. Pour cela, on utilise une résine plastique en PEF, PET ou autre, d'humidité maximale de 0,005% pour éviter tout problème de viscosité. La résine plastique est chauffée à 250-300°C et injectée dans un moule, dans lequel elle prend la forme d'un tube long et fin, que l'on appelle préforme. Le goulot final de la bouteille est ainsi formé.

Le poly(furanoate d'éthylène), polymère biosourcé, peut-il remplacer le poly(téréphtalate d'éthylène) ?

Vient ensuite le moulage par soufflage, dont le procédé est illustré ci-dessous.

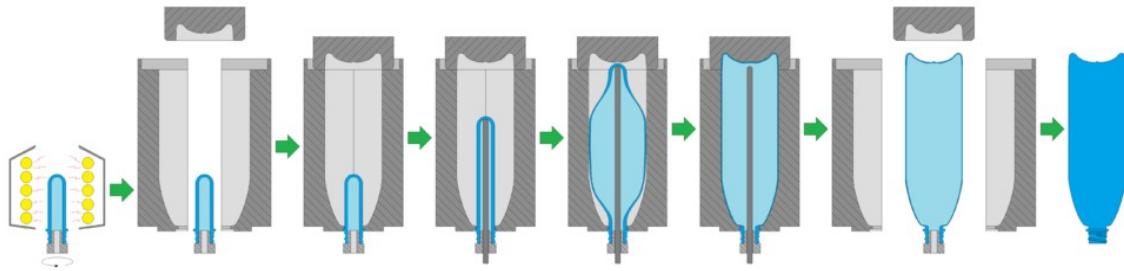


Figure 20: Procédé de moulage par soufflage [Ricardo Weyh]

La préforme, ou paraison, est placée dans un moule de la forme de la bouteille à produire, et chauffée à 80°C pour la rendre flexible. Une tige mince d'acier, appelée mandrin, est alors insérée à l'intérieur, et remplit la paraison d'air sous pression. Sous l'effet de l'air sous pression et de la chaleur la paraison gonfle, et vient épouser la forme du moule. La bouteille nouvellement formée doit alors être refroidie rapidement, de manière directe ou indirecte. De l'eau peut entourer le moule via des tubes de refroidissement, ou l'on peut utiliser de l'air sous pression, ou encore du dioxyde de carbone directement sur le moule. [Thomas Industry Update] , [Simply Science, 2015]

E. Perspectives d'évolution technique

Les perspectives techniques relatives au procédé développé par Avantium sont très riches et cristallisent de nombreuses convoitises. En effet le principal verrou technologique que connaît le procédé YXY est sans aucun doute le passage difficile du fructose au FDCA : l'obtention du HMF ou du RMF à partir de fructose n'est pas maîtrisé et pourtant ces molécules sont des intermédiaires indispensables entre le fructose et le FDCA. Or le FDCA est classé au second rang des synthons d'intérêt dans le rapport du département américain de l'énergie [DOE], et est considéré comme le futur substituant de l'acide téréphtalique ou de l'acide isophtalique, monomère issu du pétrole et qui entre dans la production des polyesters, des polyamides et des polyuréthanes. En effet, dans le cadre de la recherche pour le développement de polymères biosourcés, de nombreuses synthèses polymériques ont vu le jour. Ces nouveaux cheminements chimiques font, dans la large majorité des cas, intervenir le FDCA. Ces voies de synthèses aboutissent à un vaste panel de polymères, comme la figure ci-dessous le montre :

Le poly(furanoate d'éthylène), polymère biosourcé, peut-il remplacer le poly(téréphtalate d'éthylène) ?

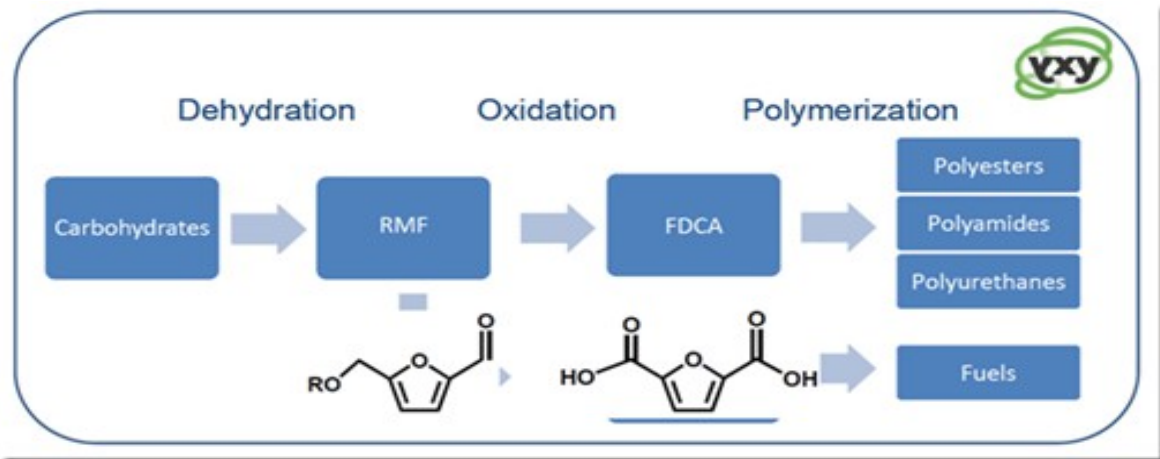


Figure 21 : Dérivés du FDCA [Gotro, 2013]

Ces familles de polymères supposent, à leur tour, un grand nombre de matériaux de nature différentes, comme l'illustre la figure, ci-dessous:

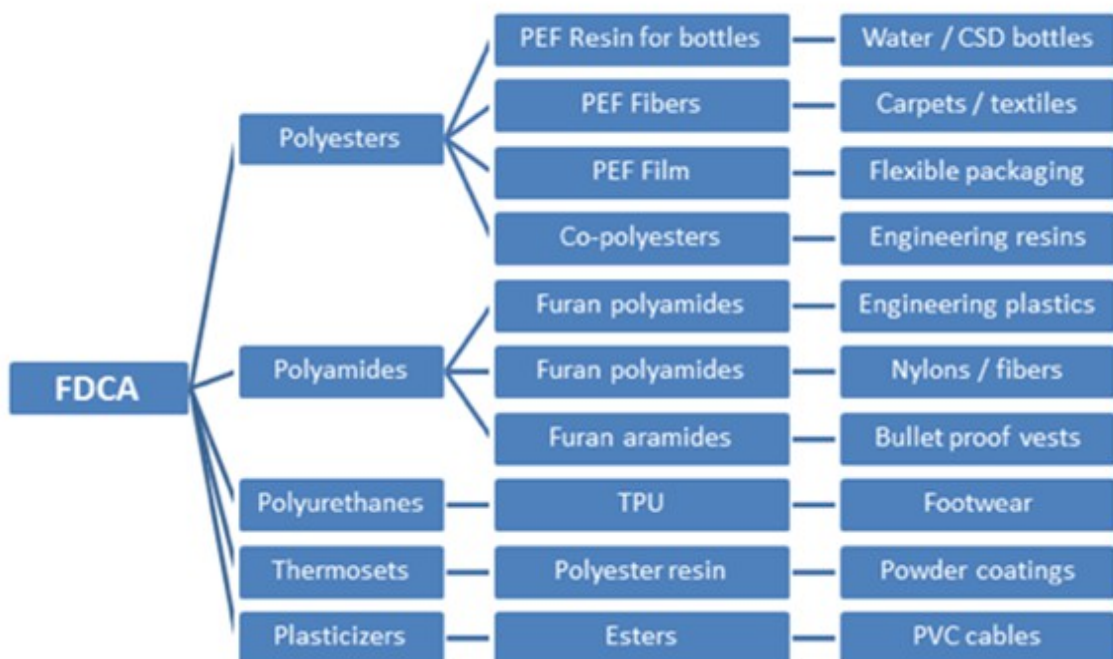


Figure 22 : Applications du FDCA [Avantium. "Products and application", 12.01.2018]

En somme le FDCA est une des molécules importantes intervenant dans la construction d'une chimie nouvelle, indépendante des ressources fossiles.

Une seconde perspective, concernant le procédé YXY, est l'obtention possible du FDCA à partir d'acide glucarique par cyclodéshydratation en milieu acide fort. [SIPOS et al, 2014]. Le schéma ci-dessous représente cette voie de synthèse :

Le poly(furanoate d'éthylène), polymère biosourcé, peut-il remplacer le poly(téréphtalate d'éthylène) ?

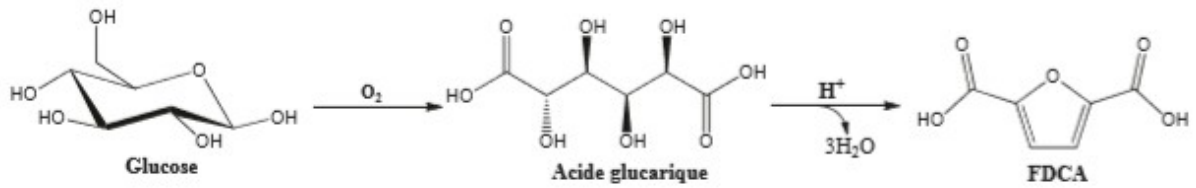


Figure 23 : Synthèse du FDCA à partir d'acide glucarique [HichamAitRass, 2014]

Le FDCA peut également être synthétisé à partir d'acide furoïque par disproportionation en présence d'un acide de Lewis. La réaction est schématisée ci-dessous :

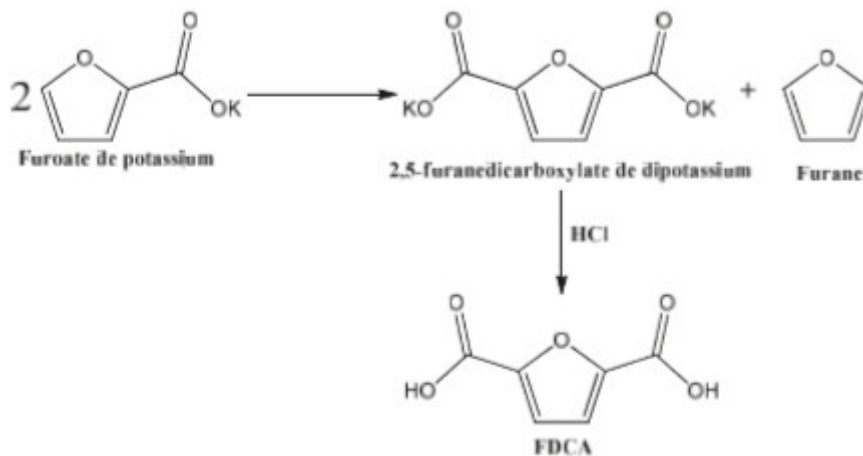


Figure 24 : Synthèse du FDCA à partir d'acide furoïque TTTTT]

Une autre perspective envisageable est la provenance du fructose, point de départ de la synthèse du FDCA. En effet, comme il a été vu précédemment, le fructose est aujourd'hui directement acheté auprès d'usines sucrières. Cependant, il pourrait être issu de la biomasse végétale. Cela éviterait une quelconque concurrence avec le domaine alimentaire et garantirait un approvisionnement renouvelable. Le procédé serait alors totalement circulaire et éthique. Pour répondre à cette attente, la principale option est le développement de la valorisation des produits ligno-cellulosiques. C'est un domaine en cours de recherche et en voie de développement. En effet les usines de pâte Kraft produisent de nombreux composés chimiques intéressants, dont les sucres. Ces produits se retrouvent réinvesti dans le procédé au lieu d'être valorisés. Toutefois il faut noter que la variation de composition chimique de la biomasse végétale rend la maîtrise de sa dépolymérisation difficile, tout comme l'extraction sélective des composés souhaités, ce qui freine donc la revalorisation.

III- Analyse concurrentielle et scénarios de développement

Le marché des bouteilles plastiques alimentaires est actuellement en pleine évolution du fait de l'amointrissement des ressources fossiles présentes sur Terre. De ce fait, le PET qui était jusqu'à maintenant le principal plastique utilisé pour la fabrication des bouteilles, pourrait se voir quelque peu déstabilisé par de nouveaux plastiques plus écoresponsables.

A) Variables essentielles et facteurs de développement

Les variables essentielles et les facteurs de développement représentent les paramètres clés à connaître afin de pouvoir déterminer si un produit va ou non se développer.

a) Variables essentielles

Ces variables se séparent en deux types de variables différentes : celles internes et celles externes. Elles caractérisent respectivement la technologie étudiée et son environnement. Elles sont détaillées ci-dessous.

- **Les variables internes** : caractérisation de la technologie

Les variables internes sont propres au processus de fabrication du PEF, elles déterminent la mise en oeuvre du procédé.

L'obtention du PEF est réalisée en plusieurs étapes chimiques, soumises chacune à des conditions particulières. Ce sont ces conditions qui déterminent les variables internes présentées ci-dessous:

- ❖ Le rendement des réactions chimiques nécessaires à l'obtention du PEF :

L'obtention du PEF se réalise via les étapes suivantes :

- déshydratation et estérification des sucres en RMF
- oxydation du RMF en FDCA
- polymérisation du FDCA et de l'éthylène glycol en PEF.

La première étape ne présente pas un rendement élevé. En effet, elle donne lieu à un sous produit parasite, l'acide lévulinique, et à un produit désiré, le HMF, mais qui est instable. La force du procédé d'Avantium est de stabiliser le HMF en estérifiant en RMF. Cependant, ce rendement reste un problème technologique qui peut mener à d'importantes pertes. S'il est trop faible, cela menace alors la rentabilité du procédé.

Concernant l'oxydation du RMF en FDCA, les recherches ont montré qu'il existe plusieurs voies d'obtention du FDCA, via des réactions catalysées dont les rendements peuvent être élevés.

Pour ce qui est de l'étape de polymérisation, elle est fortement similaire à la polymérisation menant au PET. Les conditions réactionnelles ainsi que les catalyseurs et les équipements sont les mêmes que pour la fabrication du PET. Ainsi la polymérisation du FDCA en PEF est

Le poly(furanoate d'éthylène), polymère biosourcé, peut-il remplacer le poly(téréphtalate d'éthylène) ?

plutôt bien maîtrisée car elle bénéficie de l'ensemble de la science relative au PET.

Ainsi le rendement de la première réaction est une variable déterminante pour le système : arriver à augmenter le rendement de cette première réaction, en modifiant les conditions opératoires, changer les catalyseurs ou bien opter pour un autre cheminement chimique, pourrait rendre ce procédé efficient, du point de vue industriel.

❖ Les conditions réactionnelles :

Les conditions opératoires du processus d'obtention du PEF déterminent la consommation en produits chimiques et en énergie. Cela fixe le coût de fabrication du PEF et ainsi sa viabilité sur le marché. Comme vu précédemment, l'obtention du PEF suppose de nombreuses étapes, ce qui complique fortement le procédé. En effet un nombre important d'étape suppose de nombreux équipements, une consommation importante en produits chimiques et en énergie. De plus, plus le nombre d'étapes augmente et plus la surveillance et la régulation de ces dernières deviennent difficiles. Ainsi rendre le procédé plus fluide dans sa mise en oeuvre permettrait à ce dernier d'être plus efficace industriellement.

En somme, une augmentation du rendement permettrait d'amplifier la production et l'optimisation des conditions opératoires ferait chuter le coût de fabrication. Ces deux effets convergent vers une fabrication d'un PEF plus concurrentiel.

• **Les variables externes : caractérisation de l'environnement**

Le PEF se développe au sein d'un environnement doté de certains paramètres économiques conditionnant la mise à bien de sa technologie.

❖ Le prix du pétrole :

Le cours du prix du pétrole, en nette augmentation ces dernières années, détermine le prix des matières premières utilisées dans la fabrication du PET, soit l'éthylène glycol, l'acide téréphtalique, et l'acide diméthyltéréphtalate. Cela impose donc le prix du PET, principal concurrent du PEF dans le marché des bouteilles plastiques alimentaires.

❖ Le prix des sucres :

Actuellement, les sucres, plus particulièrement les fructoses, sont les matières premières utilisées en entrée du processus de production du PEF. Leurs prix influencent, dans une certaine mesure, le prix du PEF et donc son attractivité économique. De ce fait, il ne faut pas que le prix des sucres ne soient trop élevés pour que le PEF se développe facilement.

❖ Le prix des produits chimiques employés dans la fabrication du PEF :

La production du PEF suppose de nombreux catalyseurs et autres additifs nécessaires pour stabiliser les réactions, favoriser leur rendement ainsi que réduire les temps de réaction. Le prix de ces produits détermine donc en partie le prix du PEF.

b) Facteurs clés de développement

Les facteurs de développement d'un nouveau produit sont toujours les raisons de l'émergence de ce dernier. Concernant les bouteilles plastiques alimentaires à base de PEF, ils peuvent être regroupés en quatre facteurs clés de développement. Ceux-ci sont présentés ci-dessous.

- ❖ Les subventions de la part de l'Etat en faveur d'une industrie plus respectueuse de l'environnement :

Dans le contexte actuel des choses, il peut paraître souhaitable et logique que l'état distribue plus de subventions aux industries respectueuses de l'environnement qu'aux industries plus polluantes. De ce fait, les centres de recherches ou les industriels travaillant à la fabrication de bouteilles plastiques alimentaires en PEF se verront recevoir des aides plus importantes de la part de l'Etat. Cela permettrait alors à ses structures de se développer plus facilement et plus rapidement.

- ❖ L'évolution de la législation :

Le durcissement des lois envers les industries utilisant des ressources non renouvelables bénéficiera aux industriels plus respectueux de l'environnement. Dans le meilleur des cas, les législations ne feront pas que pénaliser les industriels polluants mais aideront directement les industries plus vertes.

La législation que l'on peut observer au cours des dix dernières années montre une faible évolution dans ce sens. Elle se durcit envers les entreprises dont les matières premières sont issues du pétrole, via des taxes ou bien des malus ou encore des augmentations d'impôts. Au contraire la législation encourage les entreprises "vertes", via d'éventuelles exonérations d'impôts, ou encore des aides sous forme de bonus.

- ❖ Le développement de la valorisation de la biomasse végétale.

Le développement de sucres issus de la biomasse végétale rendrait le processus d'Avantium complet et indépendant. En effet, le PEF serait ainsi issu de déchets végétaux, toujours disponibles et en quantités importantes.

- ❖ La mode écologique :

Le réveil des consciences ces dernières années à propos des effets néfastes de l'industrie sur la planète engendre petit à petit une volonté des personnes à changer leur mode de consommation. Ainsi de plus en plus de consommateurs tendent à consommer des produits à connotations écologiques. Dans le même sens, ces consommateurs souhaitent s'éloigner des produits issus des ressources non-renouvelables comme le pétrole.

C'est ainsi que tout un marketing s'est développé autour de ce type de produits souvent appelés par raccourcis "verts", pour vanter leur respect de l'environnement. Ce jeu autour de l'image d'un produit "vert" influence beaucoup le consommateur qui est parfois prêt à acheter un produit un peu plus cher si celui-ci est certifié respectueux de l'environnement.

Cette dynamique encourage le développement du PET et freine celui du PEF.

Le poly(furanoate d'éthylène), polymère biosourcé, peut-il remplacer le poly(téréphtalate d'éthylène) ?

B) Diagramme de PORTER et chaîne de valeur

Depuis quelques années de nombreuses entreprises cherchent à développer des bouteilles en bioplastiques soit 100% renouvelable soit avec une partie d'origine végétale. Comme on l'a vu précédemment, plusieurs nouveaux bioplastiques pourraient être utilisés dans la production de bouteilles.

a) Diagramme de PORTER

Un diagramme de Porter a pour but de mettre en évidence les relations entre les différents acteurs d'un même marché économique afin de déterminer si un produit considéré a une place à prendre ou non sur ce marché.

Le diagramme de Porter ci dessous a été réalisé afin de mener à bien l'analyse concurrentielle des bouteilles plastiques alimentaires faites à base de PET.

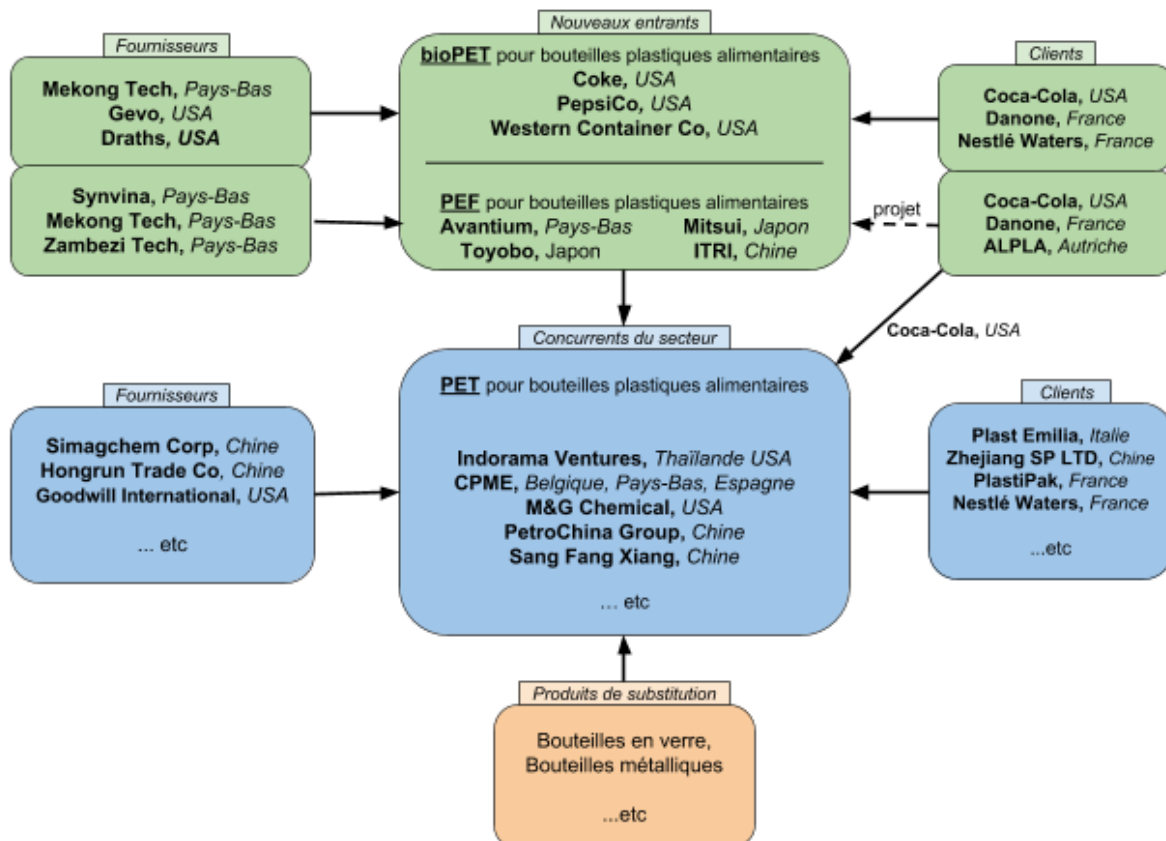


Figure 25 : Diagramme de Porter des bouteilles plastiques alimentaires

Ce diagramme permet de mettre en évidence cinq éléments clés du marché concurrentiel des bouteilles plastiques alimentaires : les concurrents du secteur, les nouveaux entrants, les fournisseurs et les clients des concurrents et des nouveaux entrants, et enfin les produits de substitution.

Le poly(furanoate d'éthylène), polymère biosourcé, peut-il remplacer le poly(téréphtalate d'éthylène) ?

Une particularité du secteur des bouteilles plastiques alimentaires est le fait que les entreprises "clients" fabriquent elles-mêmes leur bouteilles. En effet, ces dernières ne reçoivent pas les bouteilles déjà fabriquées car les coûts de transport de ces bouteilles vides serait beaucoup trop élevé. Les "clients" figurant dans le diagramme ci-dessus sont donc eux-mêmes les fabricants de leurs propres bouteilles.

De là en découle une deuxième particularité : les acteurs mis en concurrence dans ce secteur sont non pas les fabricants de bouteilles plastiques alimentaires mais les fabricants des polymères utilisés pour la fabrication de ces bouteilles.

Chaque élément principal du diagramme de Porter est détaillé ci-dessous :

- **Les concurrents du secteur, leurs fournisseurs et leurs clients :**

- ❖ Les concurrents du secteur :

Grâce à ce diagramme, nous pouvons constater que le marché des bouteilles plastiques faites en PET destinées au secteur de l'alimentaire est un marché très dense : en effet, il compte beaucoup d'acteurs, fournisseurs comme clients, et ceux-ci sont présents dans le monde entier. Cela s'explique par le fait que le PET a su se démocratiser au fil des années et est actuellement bien connu dans le monde industriel.

Le PET représentant actuellement le principal polymère utilisé pour la fabrication de bouteilles plastiques, il apparaît comme le produit à la source de la concurrence du secteur. De ce fait, les entreprises concurrentes du secteur considéré ici sont les principaux fabricants de PET.

Le leader mondial en terme de production de PET est l'entreprise thaïlandaise Indorama Ventures, basée dans sa capitale Bangkok. En 2017, elle a produit 4,2 millions de tonnes de résine de PET. En seconde place arrive la structure CPME (Belgique) réalisant environ 3 millions de tonnes de résine de PET sur l'année 2017. Sur la même année, M&G Chemical (USA), PetroChina Group (Chine) et Sang Fang Xiang (Chine) ont quant à elles produites respectivement 2,7 , 2,5 et 2,1 millions de tonnes de résine.

- ❖ Leurs fournisseurs :

Le nombre de fournisseurs de matières premières nécessaires à la production de PET sont actuellement très nombreux dans le monde du fait du long passé du PET.

Cependant, trois fournisseurs principaux se détachent : les entreprises chinoises Simagchem Corp et Hongrun Trade Co, et la structure nord-américaine Goodwill International. Ces trois entreprises produisent de l'éthylène glycol ou de l'acide téréphtalique en grande quantité, qu'ils vendent par la suite aux producteurs de PET cités ci-dessus.

- ❖ Leurs clients :

Les clients du secteur du PET fabriqué en vue de produire des bouteilles plastiques alimentaires sont des entreprises basées dans l'alimentaire et plus précisément dans les liquides comestibles. Ses entreprises sont souvent des groupes internationaux vendant leurs bouteilles plastiques dans l'ensemble du monde.

Le poly(furanoate d'éthylène), polymère biosourcé, peut-il remplacer le poly(téréphtalate d'éthylène) ?

Ces principaux clients sont par exemple Plast Emilia basé en Italie, Zhejiang SP LTD basé en Chine, PlastiPak ou encore Nestlé Waters installés en France.
A noter que Coca-Cola est également un client majeur de la production de PET.

- **Les nouveaux entrants, leurs fournisseurs et leurs clients :**

Les principaux nouveaux entrants sont au nombre de deux : le PEF et le bioPET. Ces nouveaux entrants ont un point commun essentiel : ils sont biosourcés, en partie ou à 100%. Cette similitude est d'ailleurs la raison de leur apparition sur le marché des bouteilles plastiques alimentaires.

Le PLA et les Vegan Bottles ne sont pas mentionnés ici car ces produits restent très marginaux dans le secteur des bouteilles plastiques alimentaires.

- ◆ **Le PEF :**

Nous observons que le marché des bouteilles plastiques alimentaires à base de PEF est en plein essor. En effet, les clients et les fournisseurs émergent petit à petit dans ce secteur d'activité mais restent encore peu nombreux.

Les principaux acteurs du marché du PEF connus actuellement pour leurs recherches sont au nombre de quatre : Avantium (Pays-Bas), Mitsui et Toyobo (Japon), ainsi que ITRI (Chine). L'entreprise Avantium, basée au Pays-Bas, est de très loin l'élément déclencheur de l'émergence de ce produit biosourcé. En effet, la structure néerlandaise est à la source de la centralisation de nombreuses compétences au sein d'une seule et même structure appelée Synvina. [Veillechimie, 2011-2017]

Synvina, alliant les savoirs faire de BASF et d'Avantium, est actuellement capable de produire l'ensemble des molécules nécessaires à la production de PEF. Le projet actuel de Synvina est d'industrialiser le fruit de leurs recherches. [Smith Alan, 09.05.2017]

Mekong Tech et Zambezi Tech représentent également de grands fournisseurs de bioMEG, molécule indispensable à la synthèse de PEF. [Avantium (Gruter Gert-Jan),2015]

L'élément déclencheur permettant de stimuler les nombreuses recherches concernant le PEF est facilement identifiable : il s'agit du premier client industriel intéressé par la fabrication de bouteilles en PEF, l'entreprise nord-américaine Coca-Cola. Le groupe français Danone et celui autrichien Alpla sont également de gros clients de PEF.

Pour conclure, les travaux réalisés à ce jour sur le PEF sont au stade de la recherche et non à celui de l'industrie, mais ce marché est en permanente évolution et est source de nombreux projets d'industrialisation.

- ◆ **Le bioPET :**

Le PET étant de plus en plus critiqué par rapport à ces matières premières fossiles, de nombreux nouveaux acteurs cherchent des solutions techniques pour le rendre le plus biosourcé possible. De ce fait, le bioPET a émergé dans le secteur des bouteilles plastiques alimentaires.

Le poly(furanoate d'éthylène), polymère biosourcé, peut-il remplacer le poly(téréphtalate d'éthylène) ?

Les principaux acteurs du marché du bioPET sont pour la plupart des entreprises américaines. Parmi celles-ci, les entreprises Coke, PepsiCo et Western Container Co sont les précurseurs de la production de bioPET. Produisant actuellement du PET à 30% biosourcé pour l'ensemble de ces entreprises, leur projet serait de produire un PET 100% biosourcé d'ici 2025. [Sidel]

On retrouve pour l'approvisionnement de bioMEG le même fournisseur que pour le PEF ; l'entreprise Mekong Tech. Les principaux fournisseurs de PTA biosourcé sont les deux sociétés nord-américaines Gevo et Draths.

Pour ce qui est des clients, Coca-Cola est également très intéressé par le bioPET. Coca-Cola espère vendre des bouteilles plastiques alimentaires à base de PET 100% biosourcés d'ici 2025. Deux autres clients principaux du bioPET sont les groupes français Nestlé Waters et Danone qui ont l'intention de passer du PET au PET 100% biosourcé.

- **Les produits de substitution :**

Les produits de substitution aux bouteilles plastiques alimentaires sont les bouteilles en verre et les bouteilles/canettes métalliques. En vue de la production totale de bouteilles, celles à base de verre représentaient en 2010 25% de la totalité et celles en métal 22%. (voir figure 18, II-D). Les bouteilles en plastique représentaient à l'époque 37% de cette production mondiale totale de bouteilles, dont 31% rattachées aux bouteilles à base de PET. N'étant pas considérées comme des produits de substitution principaux, les bouteilles en carton n'apparaissent pas dans le diagramme de Porter. Elles ne représentaient en 2010 que 12% de la production mondiale totale de bouteilles.

b) Chaîne de valeur du PEF

La chaîne de valeur est un diagramme mettant en évidence les opérations créant de la valeur ajoutée, cela à partir des matières premières. La chaîne de valeur du PEF est présentée ci-dessous :

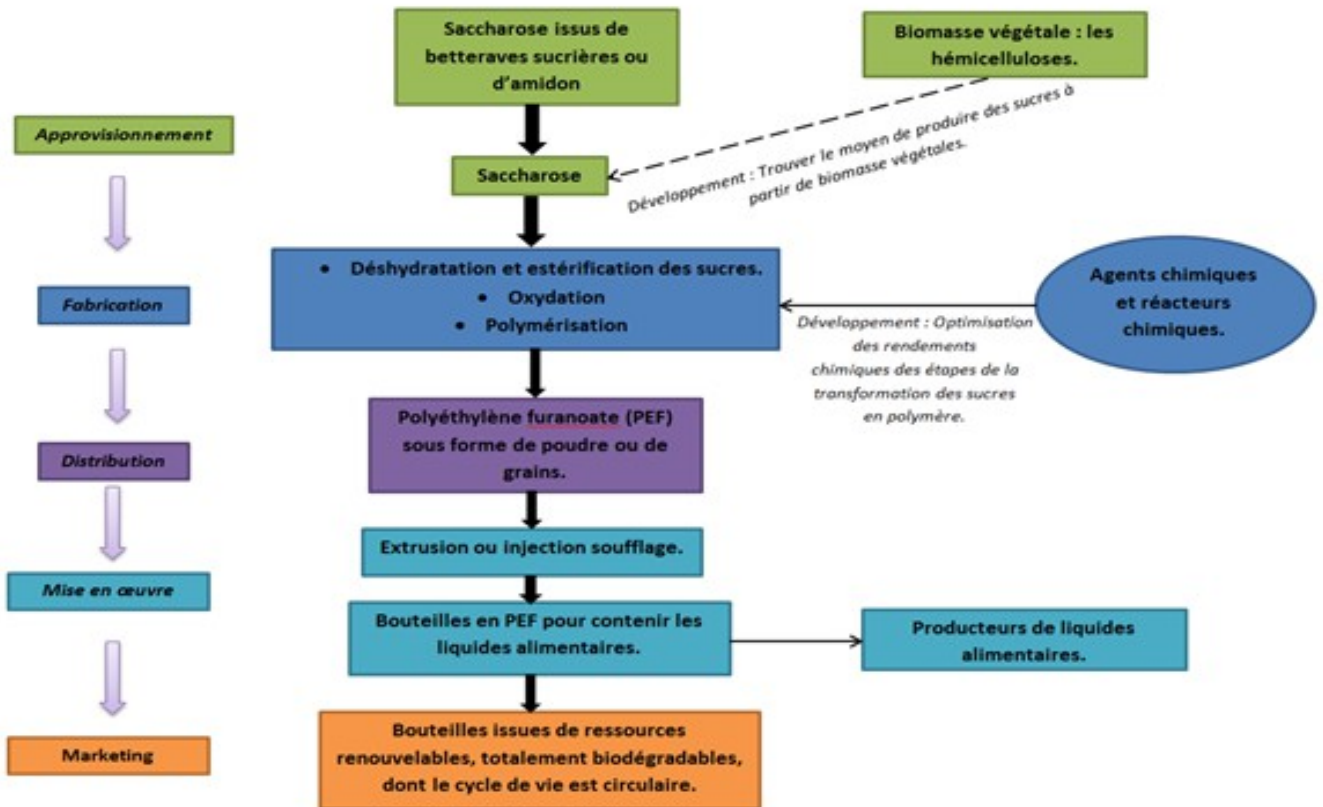


Figure 26 : Chaîne de valeur du PEF

La chaîne de valeur du PEF montre que le point de départ du procédé se compose simplement de saccharose. La matière première pourrait même dans le futur se ramener à de la biomasse végétale telle que les hémicelluloses. Cependant la valorisation de la biomasse végétale est à l'état de recherche en ce moment. Il est donc à l'heure actuelle difficile de prétendre pouvoir faire démarrer le procédé à partir de biomasse végétale et non de saccharose.

Une fois la matière première extraite, elle subit une suite de réactions chimiques telles que la déshydratation, l'estérification, l'oxydation et la polymérisation. Ces étapes ont lieu au sein de réacteurs chimiques dans lesquels sont ajoutés des agents chimiques spécifiques.

Même si le déroulement de ces opérations est onéreux en terme d'énergie, de machines et d'agents chimiques, le produit obtenu présente une forte valeur ajoutée. En effet, les grains ou la poudre de PEF peuvent être vendus aux industries produisant des liquides alimentaires en mettant en avant la totale biodégradabilité de ce plastique et son origine naturelle.

Avec cet argument marketing, le PEF pourrait avoir la capacité d'éclipser le PET du marché de la bouteille en plastique. Tout l'enjeu est d'optimiser au mieux les rendements des réactions chimiques aboutissant au PEF, cela afin de diminuer le coût de production de ce plastique biosourcé.

C) Scénarios et analyse des risques associés

Nous avons réalisé trois types de scénarios : un scénario tendanciel et deux scénarios contrastés, l'un pessimiste et l'autre optimiste. Ces derniers sont présentés ci-dessous :

Scénario 1 : Scénario tendanciel - En 2030, les bouteilles plastiques à base de PEF se seront démocratisés mais ne représenteront que 15% des bouteilles plastiques alimentaires.

Hypothèse 1 : La raréfaction des ressources pétrolières conduit les autorités à faire évoluer la législation en faveur des produits bio-sourcés. Les contraintes industrielles poussent les acteurs du marché à favoriser le remplacement des matières utilisées par leur équivalent bio-sourcés.

Hypothèse 2 : Les acteurs actuels du marché du PEF se développent, mais ce de manière relativement lente. Quelques nouveaux acteurs arrivent à émerger sur le marché du PEF.

Hypothèse 3 : Conformément à l'objectif du gouvernement, 100% des plastiques sont recyclés, biodégradés ou bio-compostés.

Hypothèse 4 : Les coûts de production des bouteilles plastiques alimentaires en PEF restent très élevés et limitent de ce fait la demande des clients.

Hypothèse 5 : Le PET biosourcé apparaît sur le marché en 2020 avec les jeux olympiques

Notre scénario débute en 2019. Les rapports scientifiques deviennent de plus en plus alarmants concernant les réserves pétrolières. De fait, la législation se voit petit à petit modifiée mais n'est cependant pas suffisamment contraignante pour que l'utilisation du pétrole se voit diminuée. Les bouteilles plastiques sont toujours en majorité issues du PET, avec une partie biosourcée ou non. L'unité pilote d'Avantium montre des résultats prometteurs, la résine PEF est intégrée dans les produits dits verts par certains grands industriels tels que Coca-Cola et Danone.

Cependant, la loi oblige les industriels à ne produire que des produits recyclables ou biodégradables/bio-compostables. Une recirculation des matières plastiques permet alors de limiter la consommation des ressources pétrolières. Le bio-PET, recyclable et annoncé comme biosourcé, devient la première matière utilisée dans le secteur des bouteilles.

Ainsi, le marché du PEF se développe mais sur le long terme : les acteurs et clients du marché deviennent de plus en plus nombreux à mesure que les réserves pétrolières disparaissent. En 2030, les bouteilles plastiques alimentaires en PEF sont commercialisées mais ne se substituent pas les bouteilles en PET et bio-PET, totalement recyclées. Elles ne représentent alors que 15% des ventes de bouteilles plastiques alimentaires.

Le poly(furanoate d'éthylène), polymère biosourcé, peut-il remplacer le poly(téréphtalate d'éthylène) ?

Scénario 2 : Scénario pessimiste - En 2030, le bio-PET aura totalement remplacé le PEF.

Hypothèse 1 : La raréfaction des ressources pétrolières conduit les autorités à faire évoluer la législation en faveur des produits bio-sourcés. Les contraintes industrielles poussent les acteurs du marché à favoriser le remplacement des matières utilisées par leur équivalent bio-sourcés.

Hypothèse 2 : Les grands industriels (Coca-Cola, Danone..) développent en priorité le bio-PET pour des raisons pratiques et économiques.

Hypothèse 3 : Conformément à l'objectif du gouvernement, 100% des plastiques sont recyclés. Cette recirculation des matières plastiques permet de limiter la consommation des matières fossiles.

Hypothèse 4 : La prédominance du bio-PET impose une stratégie de marché à bas coût.

Hypothèse 5 : L'industrialisation du PEF reste onéreuse

Notre scénario débute en 2019. Les rapports deviennent de plus en plus alarmant sur les réserves pétrolières. De fait, la législation est modifiée avec un objectif de 0 matière issue de ressources pétrolières en 2030. Les consommateurs, mieux avertis des risques pour la planète et leur consommation, favorisent alors le développement de matières issues de la biomasse, qui viennent simplement remplacer les matières existantes.

Le bio-PET, dont le développement a largement été favorisé par les grands groupes tels que Coca-Cola ou encore Danone, émerge en masse sur le marché pour se substituer à son équivalent non bio-sourcé. Le PEF tente de s'implanter sur le marché mais le coût de renouvellement des installations décourage les industriels. Son développement ralentit alors par manque de financement et sa commercialisation échoue.

En 2030, le boom du recyclé favorise toujours plus le bio-PET, qui se voit recyclé à l'infini, et à terme domine le marché.

Scénario 3 : Scénario optimiste - En 2030, plus de 80% des bouteilles plastiques seront à base de PEF.

Hypothèse 1 : La raréfaction des ressources pétrolières conduit les autorités à faire évoluer la législation en défaveur des produits pétro-sourcés. La production des bouteilles plastiques alimentaires en PET est progressivement arrêtée afin de limiter l'impact environnemental et le coût associé.

Hypothèse 2 : Les acteurs actuels du secteur des bouteilles plastiques alimentaires tels que Avantium et Mitsui se développent et de nouveaux acteurs émergent sur le marché.

Hypothèse 3 : Conformément à l'objectif du gouvernement, 100% des plastiques sont recyclés. Cette recirculation des matières plastiques permet de limiter la consommation des matières fossiles.

Hypothèse 4 : Le développement et les recherches sur la fabrication du PEF conduisent au perfectionnement des technologies et procédés de fabrication et les coûts de production baissent.

Le poly(furanoate d'éthylène), polymère biosourcé, peut-il remplacer le poly(téréphtalate d'éthylène) ?

Notre scénario débute en 2019. Les rapports deviennent de plus en plus alarmant sur les réserves pétrolières. De fait, les ressources pétrolières s'amenuisent, et deviennent trop onéreuses pour les produits de grande consommation. La législation est modifiée avec un objectif de 0 matière issue de ressources pétrolières en 2030. La loi oblige alors les industriels à ne produire que des produits recyclables, biodégradables, ou bio-compostables. Les consommateurs, mieux avertis des risques pour la planète et leur consommation, favorisent alors le développement de matières issues de la biomasse. L'unité pilote d'Avantium montre des résultats prometteurs, la résine PEF est alors utilisée par certains grands industriels tels que Coca-Cola ou encore Nestlé Waters. Le marché des bouteilles plastiques se transforme alors pour laisser la place au PEF, au bio-PET, , au PLA..

Les recherches menées par Avantium et d'autres nouveaux acteurs du PEF permettent de rendre les coûts de production du PEF moins onéreux que ceux du bioPEF. De ce fait, le marché du PEF se développe très rapidement : les acteurs et clients du marché deviennent de plus en plus nombreux du fait des coûts moins élevés des matières premières mais aussi des produits finis.

EN 2030, les bouteilles plastiques alimentaires en PEF remplacent la plupart des bouteilles à base de PET et de bio-PET : plus de 80% des bouteilles plastiques alimentaires sont fabriquées à base de PEF.

Ces trois scénarios partent d'une même base pour produire des résultats très contrastés. Ces scénarios sont fortement dépendants des différents facteurs à risques suivants :

- les fluctuations du prix du pétrole
- l'étendue et la réorientation des contraintes législatives
- le développement ou non de nouvelles technologies plus performantes

Ces trois facteurs à risque seront indéniablement la raison de la réalisation d'un seul des scénarios présentés ci-dessus.

Le poly(furanoate d'éthylène), polymère biosourcé, peut-il remplacer le poly(téréphtalate d'éthylène) ?

D) Matrice SWOT

Pour mieux comprendre le contexte dans lequel se situe le PEF, nous avons dressé une matrice SWOT reprenant les éléments étudiés jusqu'à présent.

Forces	Faiblesses
Caractère éco-responsable du PEF Caractéristiques mécaniques du PEF supérieures à celle du PET pour la production de bouteilles Expertise d'Avantium avec le procédé YXY Procédé de fabrication des bouteilles similaire au PET : pas besoin de de nouveaux investissements	Manque d'installations industrielles pour la production de PEF Manque de visibilité sur le marché
Opportunités	Menaces
Accord de la European PET Bottle Platform (EPBP) pour inclure du PEF dans les chaînes de PET recyclé Développement des applications des molécules plateformes Hausse du prix du pétrole Baisse du prix des sucres par le développement des bioraffineries	Développement d'un PET 100% bio-sourcé Développement de bouteilles 100% végétales compostables. Domination du marché des bouteilles par le PET

Figure 28 : Matrice SWOT de la fabrication des bouteilles en PEF

Le PEF présente toutes les qualités du PET avec l'avantage d'être bio-sourcé. Le contexte actuel de réduction des ressources fossiles et la prise de conscience croissante des consommateurs pousse au développement de matériaux bio-sourcés. Cependant, le manque de production à grande échelle et son absence dans les stratégies de nombreux grands groupes joue en la défaveur du PEF puisqu'il pourrait se voir doubler par le bio-PET dans les prochaines années.

Conclusion

Bien que présentant des caractéristiques similaires voire améliorées, le PEF ne s'impose pas encore pour les industriels face au PET et son équivalent biosourcé. La production de PEF à vocation commerciale n'est encore qu'au stade pilote, contrairement au bio-PET qui a déjà fait ses preuves sur le marché des bouteilles plastiques. En témoigne l'annonce de Danone et Nestlé Waters de commercialiser des bouteilles PET 100% biosourcées d'ici à 2020, avec un lancement prévu pour les jeux olympiques de Tokyo. Cet événement constitue une vitrine mondiale de choix pour le lancement d'un tel produit.

Par ailleurs, le monopole d'Avantium sur la technologie de production du PEF et le manque de produits existants en font un produit méconnu, ce qui freine d'autant plus son développement. Le développement du PEF et sa substitution au PET repose donc grandement sur la production de ses matières premières et l'engagement de la société pour des matériaux entièrement biosourcés, entreprises comme particuliers.

Le poly(furanoate d'éthylène), polymère biosourcé, peut-il remplacer le poly(téréphtalate d'éthylène) ?

Bibliographie

Actu environnement. "Dictionnaire environnement" [en ligne] Dernière mise à jour le 12.02.2018. Disponible sur :

https://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/polyethylene_terephtalate_pet.php4 (consulté le 15.02.2018)

Avantium. "PEF pilot phase set to be extended" [en ligne]. 12.01.2018. 2018, Press releases. Disponible sur : <https://www.avantium.com/press-releases/pef-pilot-phase-set-extended/>

Avantium. "Products and application", [en ligne]. 12.01.2018. Disponible sur : <https://www.avantium.com/yxy/products-applications/>

Bio-based world news. "Avantium and Mitsui aim to deliver PEF bottles for 2020 olympics." [en ligne]. 15.12.15. Disponible sur : <https://www.biobasedworldnews.com/avantium-and-mitsui-aim-to-deliver-pef-bottles-for-2020-olympics> (Consulté le 20.05.18)

Bio Futura. "Bouteilles en PLA" [en ligne] Disponible sur : <https://www.biofutura.com/fr/packaging-durable/pla-bouteilles> (Consulté le 09.04.2018)

Cerig Pagora - Bouteille en cellulose pour l'industrie alimentaire [En ligne] Disponible sur : <http://cerig.pagora.grenoble-inp.fr/memoire/2015/bouteille-cellulose.htm> (consulté le 10.04.2018)

Colisson Pascale. "Des bouteilles en plastique d'origine végétale." Les Echos [En ligne] 25.05.2017. Disponible sur : <https://www.lesechos.fr/thema/030347934697-des-bouteilles-en-plastique-dorigine-vegetale-2089463.php>

Ermenier Karine. "PET 100% bio-sourcé : Danone et Nestlé Waters détaillent leur alliance". Process Alimentaire [En ligne]. 06.03.2017. Disponible sur : <http://www.processalimentaire.com/Emballage/PET-100-bio-source-Danone-et-Nestle-Waters-detaillent-leur-alliance-30611> (consulté le 02.03.2018)

Ecostar. "Recycling PET, post consumer PET" [en ligne] Disponible sur : <https://www.ecostarplastics.com/pet-101/making-a-difference/> (consulté le 15.02.2018)

European bioplastics. "Bioplastics market data" [en ligne] Disponible sur : <https://www.european-bioplastics.org/market> (consulté le 04.04.18)

Fleurance Nature. "Le PET, un plastique écologique" [En ligne]. 17.04.2009. Disponible sur : <https://www.fleurancenature.fr/blog/le-pet-un-plastique-ecologique> (consulté le 06.03.2018)

Le poly(furanoate d'éthylène), polymère biosourcé, peut-il remplacer le poly(téréphtalate d'éthylène) ?

France Bleu - Saintes : un ingénieur fabrique les premières bouteilles 100% végétales. [en ligne]. Disponible sur : <https://www.francebleu.fr/infos/climat-environnement/saintes-un-ingenieur-fabrique-les-premieres-bouteilles-100-vegetales-1508259818> (Consulté le 27.04.2018)

Gomez Eva. "Un procédé de chimie verte permet de produire du PET à partir de déchets plastiques". Actu environnement [En ligne]. 30.06.2017. [en ligne] Disponible sur : <https://www.actu-environnement.com/ae/news/carbios-pet-plastique-dechets-chimie-verte-29302.php4> (consulté le 15.02.2018)

GOTRO Jeffrey. "Polyethylene Furanoate (PEF) : 100% Biobased Polymer to compete PET?" Polymer Innovation Blog [en ligne]. 08.04.2013. Disponible sur : <https://polymerinnovationblog.com/polyethylene-furanoate-pef-100-biobased-polymer-to-compete-with-pet/> (consulté le 15.02.2018)

Gruter Gert-Jan, Avantium. "PEF, a 100% bio-based polyester: Synthesis, properties et sustainability". 2015. EuroNanoForum. Disponible sur: http://euronanoforum2015.eu/wp-content/uploads/2015/06/PlenaryII_PEF_a_100_bio-based_polyester_Gert-JanGruter_11062015_final.pdf (consulté le 15/02/2018)

Guichon Valves. "PET - Process de fabrication du polyéthylène Téréphtalate (PET)" [En ligne]. Disponible sur : <http://guichon-vannes.com/faqs/pet-process-de-fabrication-du-polyethylene-terephtalate-pet/> (consulté le 06.03.2018)

HichamAitRass. Transformation chimique du furfural en acide 2,5-furanedicarboxylique par catalyse hétérogène. Catalyse. Université Claude Bernard - Lyon I, 2014. Français. <NNT: 2014LYO10198>. <tel-01089717>

ITRI. "Emerging bio-based PEF Polyester application" [en ligne] Disponible sur : <https://www.itri.org.tw/eng/mobile/MsgPic01/contents.aspx?&SiteID=1&MmmlD=620651711540203650&CatID=620653256266225454&MSID=745362751535753002> (consulté le 15.02.18)

Laperche Dorothée. "Le secteur du recyclage du PET en crise ?". Actu environnement [en ligne]. 02.01.2014. Publié dans le magazine Environnement & Technique n°333 (Février 2014) Disponible sur : <https://www.actu-environnement.com/ae/news/secteur-recyclage-pet-en-crise-20328.php4> (consulté le 15.02.2018)

Latieule Sylvie. "FDCA : la société commune de BASF et Avantium s'appellera Synvina". Formule Verte [en ligne]. 10.10.2016. Disponible sur : <http://formule-verte.com/fdca-la-societe-commune-de-basf-et-avantium-sappellera-synvina/>

Latieule Sylvie. "FDCA/PEF : Lancement officiel du projet PEFerence financé par le programme BBI". Formule Verte [en ligne]. 27.10.2017. Disponible sur : <http://formule-verte.com/fdcapef-lancement-officiel-du-projet-peference-finance-par-le-programme-bbi/> (consulté le 15.02.18)

Le poly(furanoate d'éthylène), polymère biosourcé, peut-il remplacer le poly(téréphtalate d'éthylène) ?

Market research explore - Global Bio-based Polyethylene Terephthalate (PET) Market size study and forecasts 2017-2025 [En ligne] Disponible sur :

<https://www.marketresearchexplore.com/report/global-bio-based-polyethylene-terephthalate-pet-market-size-study-and-forecasts-2017-2025/64474> (consulté le 04.04.2018)

NaturePlast - Bioplastiques: Evolution du marché 2017-2022 [En ligne] Disponible sur :

<http://natureplast.eu/marche-des-bioplastiques-20172022/> (consulté le 04.04.2018)

Néoplanète - Bouteilles en bioplastique, du rêve à la réalité [En ligne] Disponible sur :

<http://www.neoplanete.fr/bouteilles-en-bioplastique-du-reve-a-la-realite/> (consulté le 27.04.2018)

Planétoscope - Le marché des bouteilles d'eau [En ligne] Disponible sur :

<https://www.planetoscope.com/dechets/321-consommation-mondiale-de-bouteilles-d-eau-en-plastique.html> (consulté le 09.04.2018)

PlasticsEurope - Plastics -The Facts 2017 [En ligne] Disponible sur :

<https://www.plasticseurope.org/fr/resources/market-data> (consulté le 04.04.2018)

Plastics Insight. "Polyethylene Terephthalate (PET): Production, Price, Market and its

Properties" [En ligne]. Disponible sur : <https://www.plasticsinsight.com/resin-intelligence/resin-prices/polyethylene-terephthalate/> (consulté le 02.03.2018)

PETCore Europe. "As the voice of the European PET industry, Petcore Europe's mission is to enhance the value and sustainable growth of the complete PET value chain in Europe"

[en ligne]. Disponible sur : <https://www.petcore-europe.org/about-petcore-europe-2> (Consulté le 09.04.2018)

Ramène ta science. "Le Polytéréphtalate d'éthylène PET". Institut Villebon Georges Charpak et Chimie ParisTech [En ligne]. 10.05.2017. Disponible sur :

<https://ramenetessciences.wordpress.com/2017/05/10/le-polyterephthalate-dethylene-pet/> (Consulté le 06.03.2018)

REYNE Maurice. "Les plastiques". Hermès, Paris, 1990. Traité des Nouvelles Technologies série Matériaux. Pagination multiple.

SAYWELL Christopher, MAI Shaomin, CAPELAS Romeu Clarissa, LEGRAMANTI Neves Julio Cesar. Process for the production of poly (ethylene 2,5- furandicarboxylate) from 2,5-furandicarboxylic acid and use thereof, polyester compound and blends thereof .

[en ligne]. Brevet . WO2013097013A1. 2013-07-04.

Disponible sur : <https://patents.google.com/patent/WO2013097013A1/>

(Consulté le 14/03/2018)

Sidel. "A green future for plastic" [en ligne]. Disponible sur :

<http://www.sidel.com/about-sidel/media/inline-magazine/a-green-future-for-plastic> (Consulté le 20.05.2018)

Le poly(furanoate d'éthylène), polymère biosourcé, peut-il remplacer le poly(téréphtalate d'éthylène) ?

Simply Science. "Comment est faite une bouteille PET" [En ligne]. 03.09.2015. Disponible sur : <https://m.simplyscience.ch/archives-enfants/articles/comment-est-faite-une-bouteille-pet.html> (consulté le 01.03.2018)

SIPOS, GRUTER, KOLSTAD et al. A process for preparing a polymer product having a 2,5-furandicarboxylate moiety within the polymer backbone to be used in bottle, film or fibre applications. Brevet US20140336349A1. 13 Novembre 2014. Disponible sur : <https://patentimages.storage.googleapis.com/90/fc/7d/03ea18e4732391/US20140336349A1.pdf> (consulté le 6.03.2018)

Smith Alan. "Avantium Renewable Chemistries Update for IFBC2017". Avantium [En ligne]. 09.05.2017. Disponible sur : <https://ifbc2017.files.wordpress.com/2017/02/ifbc2017-alan-smith.pdf> (consulté le 01.03.2018)

Synvina. "The market potential of FDCA" [en ligne] Disponible sur : <https://www.synvina.com/applications-markets/market-potential-of-fdca/> (consulté le 15.02.18)

Thomas Industry Update. "Plastic Bottle Manufacturing" [En ligne]. Disponible sur : <https://www.thomasnet.com/articles/materials-handling/plastic-bottle-manufacturing> (consulté le 01.03.2018)

Vegan Bottle TM - LA nature reprend ses droits. Disponible sur : <https://www.veganbottle.com> (Consulté le 27.04.2018)

Veillechimie. "Le PEF remplace le PET dans les bouteilles" [en ligne]. IMIST-CNRST© 2011-2017. Disponible sur : <http://veillechimie.imist.ma/index.php/securite-environnement/chimie-durable/222-le-pef-remplace-le-pet-dans-les-bouteilles> (consulté le 15.02.2018)

Wikipédia. "Polyethylene terephtalate" [en ligne]. dernière modification le 05.03.2018. Disponible sur : https://en.wikipedia.org/wiki/Polyethylene_terephthalate (consulté le 15.02.18)