

* * *

Diplôme d'Etudes Spécialisées en Gestion de l'environnement

**Apports potentiels de la biotechnologie aux performances
environnementales de l'industrie chimique
Le cas de la production de polyacide lactique**

Travail de Fin d'Etudes présenté par
Nathalie De Vadder
en vue de l'obtention du grade académique de
Diplômée d'Etudes Spécialisées en Gestion de l'Environnement

Année Académique : 2002-2003

Directeur : Prof. Jacques Kummer

Remerciements :

Tout d'abord, je souhaite remercier Monsieur E. Vink (Cargill Dow) pour les informations qu'il m'a apportées concernant la production de polyacide lactique.

Je suis également reconnaissante à Messieurs J-P. Reyniers et P. Loix (Dow Chemical, Tessenderlo), et à Monsieur T. Van Melckebeke (BASF, Antwerpen), pour les visites qu'ils m'ont accordées à leurs installations de production de polystyrène.

Je remercie également le Professeur J. Kummer pour son soutien et son encadrement durant la réalisation de ce travail.

Enfin, je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers Monsieur P. Claes, Directeur général de Fedichem, pour ses marques d'intérêt et sa flexibilité très appréciées tout au long de mes études en gestion de l'environnement, ainsi que ma collègue Véronique, pour son soutien moral et son optimisme communicatif, qui m'ont aidée à mener à bien ce travail malgré les contraintes professionnelles.

RESUME

L'évolution rapide de la biotechnologie, ces dix dernières années, a permis le développement de nouveaux procédés industriels et la mise sur le marché de nouveaux produits. Le polyacide lactique fait partie de ces produits de la biotechnologie moderne. Ses applications récentes dans le domaine des plastiques, notamment dans les emballages, en font un concurrent potentiel aux plastiques traditionnels.

Le procédé biotechnologique de fabrication du polyacide lactique utilise, comme matière première, du maïs ou d'autres plantes riches en sucre, et fait notamment appel à des micro-organismes pour sa transformation en polyacide lactique. Le schéma de production est dès lors totalement différent de celui de tout plastique traditionnel.

Ce document étudie les performances environnementales des plastiques en polyacide lactique et la durabilité de leur mode de production, en prenant comme élément de comparaison le polystyrène, avec lequel il partage de nombreuses applications. Une analyse de cycle de vie conceptuelle des deux polymères permet de mettre en avant un certain nombre de différences notoires entre les impacts des deux procédés. Une comparaison exhaustive des performances environnementales s'avère toutefois impossible, du fait des nombreuses difficultés méthodologiques, liées notamment aux différences structurelles et qualitatives qui opposent les deux systèmes.

La fabrication du polyacide lactique reposant presque exclusivement sur l'utilisation de matières premières renouvelables, le procédé en lui-même est beaucoup plus efficace que son concurrent pétrochimique. Il émet beaucoup moins de substances toxiques, consomme beaucoup moins d'énergie fossile et de ressources minérales et émet beaucoup moins de gaz carbonique. De plus, les matières premières manipulées sont beaucoup moins nocives que dans l'industrie pétrochimique. Seule la charge en matières organiques des effluents de procédé peut poser problème.

Le procédé biologique met toutefois en évidence d'autres problématiques, qui ne permettent pas toujours la comparaison avec un procédé pétrochimique. Elles sont principalement liées aux activités agricoles, qui sont à la base du système de production du polyacide lactique. La pratique de cultures intensives joue un rôle important dans les phénomènes d'eutrophisation, d'acidification, de contamination du sol, de l'air et de l'eau, d'épuisement des ressources en eau, de destruction du sol et des paysages et d'appauvrissement de la biodiversité. Ces impacts pèsent d'autant plus lourdement dans le bilan du polyacide lactique que les terres cultivées doivent s'étendre sur des superficies immenses pour pouvoir approvisionner le site de production.

A ces considérations environnementales peuvent venir se superposer des problèmes d'espace, de disponibilité et d'accessibilité des matières premières et donc de transports, qui mettent à mal l'applicabilité d'un système de production de bioplastiques à grande échelle, dans de nombreux pays.

Un procédé basé sur l'utilisation de résidus agricoles, actuellement en phase d'étude, pourrait toutefois résoudre ces problèmes d'ici quelques années. Les impacts négatifs de l'agriculture rentrant beaucoup moins en ligne de compte, les avantages environnementaux du procédé-même de production pèseraient davantage dans l'analyse de cycle de vie. L'importante consommation d'eau et les émissions eutrophisantes restent encore problématiques, mais, contrairement aux impacts de l'agriculture, elles peuvent espérer des solutions des progrès de la technologie.

En attendant, les bioplastiques devraient, dans la mesure du possible, être destinés en priorité à des applications qui tirent profit de leur biodégradabilité, c'est à dire dans les produits qui ne peuvent être recyclés ou réutilisés, à condition toutefois que les déchets dits « biodégradables » le soient réellement et qu'une valorisation de ces substances dans l'agriculture n'engendre pas de contamination à court ou à long terme.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	1
1. Objectif et plan du document	1
2. Evolution des performances environnementales de l'industrie chimique	2
3. Les progrès de la biotechnologie	3
4. Les biopolymères plastiques	5
ETUDE D'UN CAS D'APPLICATION INDUSTRIELLE DE LA BIOTECHNOLOGIE : LA PRODUCTION DE POLYACIDE LACTIQUE	8
1. Méthodologie	8
1.1. Définition du système	8
1.2. Hypothèses de travail	10
1.3. Difficultés méthodologiques	11
1.4. Présentation des données	15
2. Production du polyacide lactique (PLA): analyse du cycle de vie	17
2.1. Propriétés du polyacide lactique	17
2.2. Marché du polyacide lactique	18
2.3. Description du système de production	20
2.4. Potentiel d'amélioration	24
2.5. Fin de vie des produits en polyacide lactique	25
2.6. Facteurs de pression environnementale	25
a. consommation de matière	25
b. consommation d'eau	28
c. consommation énergétique	29
d. émissions de gaz à effet de serre	31
e. autres émissions atmosphériques	31
f. émissions dans l'eau	32
g. déchets solides	33
h. contamination des sols	36
i. toxicologie	37
j. sécurité	39
k. utilisation d'espace	40
l. paysages	40
m. biodiversité	41

3.	Production du polystyrène standard (PS): analyse de cycle de vie	42
3.1.	Propriétés du polystyrène	42
3.2.	Marché du polystyrène	43
3.3.	Description du système de production	44
3.4.	Potentiel d'amélioration du procédé	47
3.5.	Fin de vie de produits en polystyrène	48
3.6.	Facteurs de pression environnementale	48
a.	consommation de matière	48
b.	consommation d'eau	49
c.	consommation énergétique	49
d.	émissions de gaz à effet de serre	52
e.	autres émissions atmosphériques	53
f.	émissions dans l'eau	55
g.	déchets solides	58
h.	contamination des sols	60
i.	toxicologie	60
j.	sécurité	61
k.	utilisation d'espace	63
l.	paysages	63
m.	biodiversité	64
4.	Evaluation comparative et discussion des impacts environnementaux de la production de polyacide lactique et de polystyrène	65
4.1.	Consommation de matière	66
4.2.	Consommation d'eau	68
4.3.	Consommation d'énergie fossile	69
4.4.	Emissions de gaz à effet de serre	72
4.5.	Autres émissions atmosphériques	74
4.6.	Emissions dans l'eau	75
4.7.	Déchets solides	76
4.8.	Contamination des sols	76
4.9.	Toxicologie	76
4.10.	Sécurité	77
4.11.	Utilisation d'espace	78
4.12.	Paysages	79
4.13.	Biodiversité	79
4.14.	Synthèse	80

CONCLUSIONS	81
1. Bilan environnemental	81
2. Durabilité industrielle : application au contexte européen	82
3. Conclusion générale	85

LISTE DES ILLUSTRATIONS

<u>Figures</u> :	page	
1.1	Système de production du polystyrène	8
1.2	Système de production du polyacide lactique	8
1.3	Cycle de vie du polyacide lactique (Cargill Dow)	9
1.4	ACV « cradle to pellet » et ACV « cradle to grave »	10
2.1	Diagramme des flux du système de production de polyacide lactique	20
2.2	Produits de la culture et du raffinage du maïs aux USA	22
2.3	Schéma de réaction du polyacide lactique	23
3.1	Applications du polystyrène (PS, PSC & PSE)	42
3.2	Diagramme des flux du système de production de polystyrène	44
3.3	Schéma des procédés de raffinage du pétrole	45
3.4	Schéma de réaction du polystyrène	47
3.5	Consommation de ressources énergétiques	50
3.6	Ressources énergétiques, hors matière première, par vecteur énergétique primaire	51
3.7	Ressources énergétiques par vecteur énergétique primaire	51
4.1	Consommation d'eau PLA – PLA B/WP- PS et autres polymères	69
4.2	Consommation d'énergie fossile PLA – PLA B/WP- GPPS et autres polymères	70
4.3	Consommation d'énergie fossile PLA B/WP- PS « cradle to grave »	70
4.4	Emissions de gaz à effet de serre PLA – PLA B/WP- GPPS et autres polymères	72
4.5	Emissions de CO ₂ PLA B/WP- PS « cradle to grave »	73

<u>Tableaux :</u>	page
1.1 Comparaison méthodologique des ACV du PLA et du PS	13-14
1.2 Paramètres et critères d'appréciation	15
1.3 Procédure d'évaluation des performances environnementales de la production du polyacide lactique par rapport à la production de polystyrène	16
2.1 Propriétés et applications du polyacide lactique et du polystyrène	17
2.2 Cultures de betteraves, de blé et de maïs dans l'UE	26
2.3 Consommation d'énergie pour la production de polyacide lactique	29
2.4 Emissions résultant de la production d'électricité (g/kWh)	32
3.1 Matière première hors pétrole et gaz naturel	48
3.2 Consommation d'eau	49
3.3 Emissions de GES	52
3.4 Autres émissions atmosphériques	53
3.5 Emissions dans l'eau	55
3.6 Déchets solides	58
3.7 Evolution des modes de traitement des déchets	63
3.8 Déchets municipaux : élimination et recyclage	63
4.1 Consommation de matière PLA – PLA B/WP – PS	66
4.2 Consommation d'eau PLA – PLA B/WP – PS	68
4.3 Consommation d'énergie fossile PLA – PLA B/WP – PS « cradle to pellet », « cradle to cup » et « cradle to grave »	69
4.4 Emissions de gaz à effet de serre PLA – PLA B/WP – PS « cradle to pellet », « cradle to cup » et « cradle to grave »	72
4.5 Autres émissions atmosphériques PLA – PLA B/WP – PS	74
4.6 Effets des émissions atmosphériques hors GES : PLA – PLA B/WP – PS	75
4.7 Emissions dans l'eau PLA – PLA B/WP – PS	75
4.8 Déchets solides PLA – PLA B/WP – PS	76
4.9 Contamination des sols PLA – PLA B/WP – PS	76
4.10 Toxicologie PLA – PLA B/WP – PS	76
4.11 Sécurité PLA – PLA B/WP – PS	77
4.12 Occupation d'espace PLA – PLA B/WP – PS	78
4.13 Synthèse des analyses de cycle de vie PLA – PLA B/WP – PS	80

LISTE DES ANNEXES

- Annexe 1 : Exemples d'applications du polyacide lactique
- Annexe 2 : Exemples d'applications du polystyrène standard
- Annexe 3 : Photo d'un site de production de polyacide lactique (Cargill Dow)
- Annexe 4 : Photo d'un site de production de polystyrène (BASF Antwerpen)
- Annexe 5 : The human influence on atmosphere and climate, IPCC

ABBREVIATIONS

- ACV : analyse de cycle de vie
- COV : composés organiques volatils
- DBO : demande biochimique en oxygène
- DCO : demande chimique en oxygène
- GES : gaz à effet de serre
- GPPS : polystyrène standard (« general purpose polystyrene »), aussi appelé « polystyrène cristal »
- HAP : hydrocarbures aromatiques polycycliques
- PLA B/WP : polyacide lactique produit par un procédé en projet, basé sur l'utilisation de biomasse comme source de matière première et d'énergie et sur l'énergie éolienne, dont Cargill Dow prévoit la mise en route d'ici 5 à 8 ans
- PLA : polyacide lactique
- PS : polystyrène (sans précision, il ne désigne ici que le polystyrène standard)

INTRODUCTION

1. OBJECTIF ET PLAN DU DOCUMENT

De nombreux scientifiques et industriels s'accordent à dire que la biotechnologie est porteuse de promesses pour la réduction des impacts environnementaux des activités industrielles. Ce domaine, baptisé « biotechnologie blanche », occupe une part croissante des efforts en recherche et développement. Des cas concrets d'application de cette technologie à l'échelle industrielle ont été décrits notamment par l'OCDE comme des exemples de réussites économiques et environnementales.

Voulant étudier de plus près la contribution potentielle de cette nouvelle technologie aux progrès environnementaux de l'industrie chimique, je me suis intéressée à une application industrielle particulière : la production de polyacide lactique à partir de biomasse, pour la fabrication de plastiques. La production de polyacide lactique est un exemple particulièrement intéressant, pour plusieurs raisons. D'une part, elle exploite deux voies de la biotechnologie : l'utilisation de biomasse comme matière première et l'utilisation d'enzymes comme catalyseurs. C'est donc un procédé en grande partie biologique. Par ailleurs, on assiste, dans ce cas, au développement tant d'un nouveau procédé que d'un nouveau produit. Le plastique obtenu par ce procédé biologique vient en effet concurrencer d'autres plastiques sur le marché.

Mon travail consistera à étudier les performances environnementales du bioprocédé de polyacide lactique, et, de là, à examiner dans quelle mesure celui-ci s'inscrit dans le concept de développement durable. Dans ce but, une comparaison avec un plastique traditionnel choisi pour la similitude de ses caractéristiques et de ses applications, en l'occurrence le polystyrène, m'a semblé indiqué pour mieux faire ressortir les avantages et les inconvénients du nouveau procédé. Cette évaluation se fera sur base d'une analyse de cycle de vie conceptuelle des deux produits comparés. Dans cette analyse, je m'attacherai également à identifier les potentiels d'amélioration des deux procédés étudiés.

Le document commence par une introduction générale sur l'évolution des rapports entre l'industrie chimique et l'environnement, les mécanismes et les domaines d'application de la biotechnologie, et l'évolution des bioplastiques. La deuxième partie, qui constitue le corps du travail, est consacrée à l'étude de cas de la production du polyacide lactique. Cette partie est subdivisée en quatre grands chapitres. Dans un premier temps, je présenterai la méthode de travail, c'est à dire les outils, l'objet de l'étude, les difficultés méthodologiques rencontrées et la procédure d'évaluation des systèmes étudiés. Les deuxième et troisième chapitres sont consacrés à une analyse de cycle de vie respectivement du polyacide lactique et du polystyrène, commençant par une courte description du produit et du système de production pour ensuite identifier les impacts de chacun d'eux dans différents domaines de l'environnement. Le quatrième chapitre confrontera les résultats des analyses des deux systèmes et tentera une évaluation des performances du polyacide lactique vis-à-vis du polystyrène, pour chacun des critères environnementaux, préparant ainsi la discussion finale qui sera l'objet de la dernière partie du travail.

2. EVOLUTION DES PERFORMANCES ENVIRONNEMENTALES DE L'INDUSTRIE CHIMIQUE

Les rapports entre l'industrie et l'environnement ont énormément évolué au cours des dernières décennies, passant progressivement d'un modèle d'exploitation pur et simple à un modèle de gestion. On assiste, à partir des années 1970, à un éveil de la conscience écologique tant de la population, que du monde politique et industriel. Cette prise de conscience de l'importance de l'environnement et du rôle de l'entreprise dans sa protection, s'explique de deux manières. D'abord, par l'évolution des connaissances scientifiques dans le domaine de l'environnement, et notamment sur la toxicité de certaines substances chimiques et sur les mécanismes de cause à effet entre pollution et atteintes à la santé humaine et à l'environnement. Ensuite, par la médiatisation de grandes catastrophes industrielles qui ont littéralement secoué les esprits - fuite de dioxine dans l'atmosphère à Seveso en 1976, émission dans l'atmosphère d'isocyanate de méthyle à Bhopal en 1984, rejets d'herbicides toxiques dans le Rhin à Bâle en 1986, ... - et de phénomènes de pollution chronique comme les pluies acides, le smog, l'attaque de la couche d'ozone, l'effet de serre, ...

L'environnement a, depuis lors, pris une place de plus en plus importante dans les politiques des entreprises industrielles, non seulement en raison de réglementations de plus en plus sévères, mais aussi en raison de la place de plus importante de l'environnement dans l'image de marque des entreprises.

Les réglementations européennes en matière d'environnement visent autant la sécurité des installations industrielles, afin de limiter les risques d'accidents – c'est notamment le cas de la directive Seveso « concernant les risques d'accidents majeurs de certaines activités industrielles », qui voit le jour en 1982, suivie en 1985 par une directive visant à harmoniser les conditions des études d'incidence – que leurs performances environnementales, afin de limiter la pollution chronique contribuant aux phénomènes de smog, de pluies acides, d'eutrophisation, de contamination chimique, de réchauffement climatique, En 1996, la directive IPPC intègre et coordonne l'ensemble des exigences en matière de pollution de l'eau, de l'air et du sol et de la gestion des déchets en introduisant le système de permis intégral d'environnement. Cette directive s'adresse aux grandes installations industrielles et émet des exigences quant à l'utilisation des meilleures techniques disponibles, la limitation des émissions polluantes, la gestion responsable des déchets, l'efficacité énergétique, la prévention et la gestion des accidents et des pollutions.

Au-delà du respect des réglementations environnementales, on remarque que l'industrie est également motivée à adopter une réelle philosophie environnementale, qui renforce son image de marque vis-à-vis du public et des stakeholders. Ainsi se développent, dans les années 1990, des systèmes de gestion et d'audit environnementaux (ISO, EMAS, « Entreprise écodynamique »,...), des prix environnement visant à récompenser des entreprises pour leurs efforts en matière d'environnement (prix Responsible Care de l'industrie chimique décerné par la Fédération des Industries chimiques de Belgique, prix de l'environnement lancé par la Fédération des Entreprises de Belgique, le « European Better Environment Awards for Industry » lancé par la Commission européenne en 1987,...).

Sous la pression d'une législation environnementale toujours plus sévère et dans le souci de soigner son image de marque, l'industrie européenne, et plus particulièrement l'industrie chimique, a, en deux décennies, réalisé des efforts considérables pour réduire ses impacts sur l'environnement. Même si les traditionnelles technologies de bout de chaîne (traitement des fumées, épuration des eaux, des boues, recyclage des solvants,...) sont encore le plus souvent utilisées, les industriels se tournent de plus en plus vers des technologies plus propres, lorsqu'ils envisagent de nouveaux investissements¹. Outre leurs qualités

¹ En 1999, les investissements indirects représentaient 44% des investissements en matière d'environnement, de sécurité et santé et d'économies d'énergie en 1999 [Source : Fedichem (2001), *Le Responsible Care dans la pratique - Indicateurs de performances*]

environnementales, celles-ci peuvent également s'avérer être économiques, puisqu'elles permettent bien souvent de réduire la consommation de matière première, d'eau, de combustible et les quantités de déchets et d'émissions.

L'industrie chimique européenne a développé le programme Responsible Care. En adhérant à cette charte, les entreprises s'engagent à améliorer leurs performances environnementales de manière continue. Entre 1996 et 2001, l'industrie chimique européenne a diminué ses émissions de SO₂, de NO_x, de COV dans l'air de, respectivement, 44%, 25% et 40%. Grâce à des améliorations notoires en matière d'efficacité énergétique, elle est parvenue à diminuer ses émissions de CO₂ de 7% en 2000 en par rapport au niveau de 1990, malgré une hausse de production de 37%². Les émissions dans l'eau, entre 1996 et 2001, ont baissé de 75%, 32%, 27% et 24% pour respectivement les composés phosphorés, azotés, les métaux lourds et la DCO. Sur la même période, les accidents liés à la distribution de produits chimiques ont diminué de 25%.

Tenant compte des progrès déjà réalisés, il est difficilement concevable que l'industrie chimique puisse poursuivre cette évolution indéfiniment avec des procédés classiques. En Belgique, d'ailleurs, la baisse des émissions spécifiques de l'industrie chimique s'est ralentie depuis une décennie et ne suffit plus pour compenser l'évolution de la production. C'est particulièrement le cas de ses émissions absolues de dioxyde de carbone, qui ont augmenté de près de 70% en une dizaine d'années. Cette évolution est due en partie au démarrage, dans les années nonante, de plusieurs installations importantes à haute intensité énergétique pour la production de produits chimiques de base, mais aussi au fait que la chimie butte contre les lois de la thermodynamique et approche de près la limite technique des possibilités d'amélioration de l'efficacité énergétique.

Pour poursuivre ses efforts environnementaux, l'industrie, et plus particulièrement l'industrie chimique, devra donc compter sur des percées dans le domaine de la recherche et sur l'avènement de nouvelles technologies. Des découvertes importantes continuent à se faire notamment dans le domaine des catalyseurs. Mais des espoirs grandissants reposent actuellement sur une branche novatrice : la **biotechnologie**.

3. LES PROGRES DE LA BIOTECHNOLOGIE

La biotechnologie en tant que telle n'est pas une technique nouvelle : des micro-organismes tels des levures, des bactéries, des champignons interviennent déjà depuis des millénaires dans la fabrication du pain, du vin, de la bière, du fromage. Beaucoup plus tard, elle a fait son entrée dans le **domaine médical**, avec la découverte de la pénicilline en 1928. Les recherches sur l'ADN ont par la suite débouché sur de nouvelles percées dans le domaine pharmaceutique, avec notamment la mise sur le marché d'insuline humaine recombinante en 1982 et du premier vaccin recombinant (contre l'hépatite B) en 1986. C'est dans le secteur de la santé que la biotechnologie compte d'ailleurs le plus d'applications encore maintenant. Cela s'explique par la haute valeur ajoutée de ce type de produits et par les travaux importants de recherche dans ce secteur.

Plus récemment, le génie génique a trouvé des applications dans le **domaine agricole**, avec l'avènement des plantes transgéniques en 1994³.

Enfin, l'étude de certains micro-organismes a permis de découvrir le rôle bénéfique qu'ils peuvent avoir pour **l'environnement**. On peut distinguer deux approches : l'approche « remédiation » et l'approche « prévention de la pollution à la source ». Dans le premier cas, on fait appel à des plantes ou des micro-organismes, éventuellement modifiés génétiquement, capables de capter des substances toxiques et de les concentrer ou de les métaboliser en substances inertes ou moins dangereuses. Cette technique, appelée « **bioremédiation** », est

² CEFIC (2003), *Responsible Care – Status Report : Europe 2002*.

³ BIOTECHNOLOGY INDUSTRY ORGANIZATION (BIO) -A timeline of biotechnology, <http://www.bio.org/timeline/timeline.html>.

de plus en plus utilisée pour l'épuration des eaux, la décontamination des sols, la digestion des nappes de pétrole.

Le rôle de la biotechnologie dans la **prévention de la pollution à la source** s'inscrit, quant à lui, dans la philosophie plus moderne de durabilité industrielle. L'intérêt pour ce concept est plus récent et les applications industrielles de la biotechnologie en sont encore à leur début. En témoigne l'évolution des travaux de l'OCDE, qui a publié en quelques années trois rapports sur les applications environnementales des biotechnologies : *Biotechnology for a Clean Environment* (1994), traitant essentiellement de la bioremédiation, *Biotechnology for clean industrial products and processes* (1998) et *The application of biotechnology to industrial sustainability* (2001), comportant des études de cas couvrant différents **secteurs industriels** : la pharmacie, la chimie fine et la chimie lourde, l'agroalimentaire, le textile, le papier, l'exploitation minière et l'énergie.

L'OCDE définit la biotechnologie comme « l'application d'organismes, de systèmes et de procédés biologiques à la production de biens et de services ».⁴

Les applications de la biotechnologie dans l'industrie sont de deux types :

- la substitution de matière première renouvelable (**biomasse** : blé, maïs, soja, tournesol, pommes de terre, betterave, canne à sucre...) au pétrole ;
- l'utilisation d'un procédé biologique, basé sur l'utilisation de cellules ou d'enzymes comme réactifs ou comme **catalyseurs**.

Dans de nombreux procédés biotechnologiques, ces deux aspects de la biotechnologie sont combinés.

Dans plusieurs domaines, des analyses de cycle de vie ont démontré la supériorité, sur le plan environnemental, du procédé biotechnologique par rapport au procédé classique. Par ailleurs, la biotechnologie peut apporter, dans de nombreux cas, des améliorations sur le plan économique également, comme le démontre le programme Bio-Wise, qui a identifié, en Angleterre, un potentiel de 70.000 entreprises de production qui pourraient réduire leurs coûts et augmenter leurs profits en ayant recours à la biotechnologie dans leurs procédés⁵.

Un des procédés biologiques les plus souvent cités comme exemple de réussite sur le plan environnemental et économique est le procédé de fabrication de la vitamine B2 (riboflavine). Au procédé chimique, caractérisé par plusieurs étapes, se substitue un procédé de fermentation d'une étape faisant intervenir une levure génétiquement modifiée. Les résultats de la comparaison des analyses de cycle de vie de ces deux procédés penchent fortement en faveur du procédé biologique : réduction des déchets chimiques dangereux, remplacés par des déchets organiques compostables ; réduction des rejets dans l'eau et des émissions dans l'air et réduction des coûts de 50%.⁶

La biotechnologie a surtout un impact dans la production de produits pharmaceutiques, où elle occupe actuellement 15% du marché⁷. Les enzymes occupent également une place importante dans les détergents (protéases, lipases). La biotechnologie trouve des applications dans de nombreux autres secteurs industriels. Citons, à titre d'exemple, l'utilisation, dans la fabrication de la pâte à papier, de champignons dégradant la lignine, l'utilisation de cellulases pour obtenir un effet décoloré (« stonewashing ») dans la confection des jeans, la production enzymatique d'acrylamide, utilisé dans les fibres synthétiques et comme agent flocculant.

L'avantage environnemental des biocatalyseurs réside dans leur spécificité (moins de produits secondaires) et leur sélectivité (ils nécessitent des matières premières moins purifiées). En

⁴ OECD (1998), *Biotechnology for clean industrial products and processes*.

⁵ OECD (2001), *The application of biotechnology to industrial sustainability*.

⁶ Ibid.

⁷ Source: Mc Kinsey, cité par Dirk Carrez dans "The use of renewable feedstock in chemical production – biomass", Presentation at the Sustech 12 Event, 18-19 June 2002, Cefic.

outre, les biocatalyseurs permettent dans de nombreux cas de réduire le nombre d'étapes du procédé. Les procédés à base d'enzymes présentent généralement l'avantage de fonctionner à des températures et des pressions plus basses, conduisant à des économies d'énergie, et de générer moins de déchets et d'émissions toxiques que les procédés chimiques classiques. Un grand inconvénient reste toutefois à résoudre : l'importante consommation d'eau souvent liée à ce type de procédé.

L'utilisation de micro-organismes **génétiquement modifiés** peut contribuer à réduire substantiellement la consommation de matière première et d'énergie du procédé. En recourant au génie génétique, on peut également modifier un micro-organisme de manière à ce qu'il résiste à de hautes températures, à des concentrations élevées de solvants ou encore à d'autres conditions industrielles auxquelles les organismes traditionnels ne peuvent survivre. Le peu de recul que nous avons par rapport à ces substances nouvelles est cependant à l'origine d'un grand nombre d'incertitudes scientifiques quant à leur devenir. Le principe de précaution y occupe donc une grande place.

4. LES BIOPOLYMERES PLASTIQUES

Les progrès récents de la biotechnologie ont notamment permis de développer de nouveaux plastiques biodégradables, à partir de ressources renouvelables. Ce n'est toutefois pas dans une optique environnementale que les polymères biodégradables ont pénétré sur le marché. Leur coût élevé ne leur permettait de concurrencer les polymères classiques que s'ils possédaient des caractéristiques uniques leur conférant une valeur ajoutée. C'est le cas des **polymères biodégradables absorbables**, utilisés depuis les années 60 dans le secteur médical. Fabriqués à base d'acide lactique ou glycolique ou de polyhydroxyalkanoates, ces fils de suture, broches et prothèses chirurgicales absorbables évitent une deuxième opération, délicate et coûteuse, puisqu'ils se résorbent lorsque les tissus sont cicatrisés ou la fracture réparée. De par ses propriétés intrinsèques, le polyacide lactique atteint depuis peu d'autres marchés à créneaux, comme celui des textiles, où, utilisé en combinaison avec d'autres fibres synthétiques ou naturelles, il confère aux vêtements de nouvelles qualités (légèreté, résistance à l'usure, texture soyeuse, imperméabilité tout en laissant passer la transpiration, ...).

Dans le domaine des plastiques, des entreprises américaines, dans les années 80, ont introduit sur le marché, des mélanges de polyoléfines et d'amidon, les présentant comme des plastiques biodégradables. Ils étaient utilisés dans la fabrication de sacs à ordures, d'emballages alimentaires, d'assiettes jetables, dans le but de résoudre le problème de la mise en décharge des déchets. Il s'est toutefois avéré que certains de ces plastiques dits « **biodégradables** » ne se décomposaient que partiellement. Cette découverte a jeté le discrédit sur les plastiques biodégradables et a créé le besoin d'établir des définitions et des normes garantissant la biodégradabilité d'un produit.

Le terme « bioplastique » est généralement utilisé pour des polymères d'origine naturelle biodégradables. Tous les plastiques biodégradables ne sont pas des plastiques d'origine naturelle. Par exemple, les polycaprolactones et les polyvinylalcools sont des polymères de synthèse généralement dérivés du pétrole. Toutefois, la définition de la biodégradabilité varie avec les normes et les tests appliqués.

Les emballages biodégradables sont définis dans la directive européenne 94/62/CE relative aux emballages et aux déchets d'emballages comme étant « de nature à pouvoir subir une décomposition physique, chimique, thermique ou biologique telle que la plus grande partie du compost obtenu se décompose finalement en dioxyde de carbone, en biomasse et en eau »⁸.

⁸ Directive 94/62/CE du Parlement européen et du Conseil du 20 décembre 1994 relative aux emballages et aux déchets d'emballage.

La même directive définit les emballages valorisables par compostage comme devant être « suffisamment biodégradables pour ne pas faire obstacle à la collecte séparée ni au processus ou à l'activité de compostage dans lequel (laquelle) ils sont introduits ».

Ces définitions sont très floues. Heureusement, des normes existent aujourd'hui pour préciser ces notions de biodégradabilité et de compostabilité. Cependant, toutes formulent des définitions légèrement différentes les unes des autres. Une harmonisation est nécessaire et une nouvelle directive amendant la directive de 1994 est actuellement en projet pour tenter de remédier à cette confusion au niveau de l'Union européenne.

Ces dix dernières années, grâce à la reprise des travaux de recherche dans le domaine des bioplastiques, différents plastiques ont été développés à partir de **ressources renouvelables**. On distingue trois catégories de bioplastiques :

1. les polymères directement extraits de la biomasse : par exemple, des polysaccharides comme l'amidon et la cellulose et des protéines comme la caséine et le gluten;
2. les polymères produits par synthèse chimique à partir de monomères produits par la fermentation d'hydrates de carbone issus de la biomasse : par exemple, le polyacide lactique ;
3. les polymères produits par des micro-organismes, éventuellement génétiquement modifiés : par exemple, les polyhydroxyalcanoates.

Jusqu'il y a peu, le marché des plastiques issus de biomasse était dominé par les plastiques à base **d'amidon**. La firme Novamont, basée en Italie depuis une dizaine d'années, a été le principal producteur de ce type de plastique, avec une capacité de production de 20.000 tonnes par an. Son produit, le Mater-Bi, est utilisé pour fabriquer des sacs de compost, des services fast-food, des emballages, des films d'agriculture et des produits d'hygiène. Depuis quelques années, d'autres firmes ont commencé à exploiter le marché, en Europe, comme par exemple Rodenburg Biopolymers (capacité de production : 40.000 tonnes par an). Son produit, Solanyl, provient de la transformation d'épluchures de pommes de terre, en provenance de l'industrie transformatrice de la pomme de terre, l'application principale de ce plastique étant des pots de fleurs. Depuis la mise en route, en novembre 2001, au Nebraska, de l'installation de production de Cargill Dow d'une capacité annuelle de près de 140.000 tonnes, le polyacide lactique vient en tête, portant à présent la production de bioplastiques à plus de 200.000 tonnes par an. Les polyhydroxyalcanoates et le 3GT ne sont, quant à eux, pas encore commercialisés. Le CRIF estimait la capacité de production mondiale de plastiques biodégradables en 2002/2003 à 259.000 tonnes par an, dont 231.000 tonnes à base de ressources naturelles.⁹ Ce tonnage représente toutefois une part négligeable de la production totale de plastiques, en l'occurrence moins d'1%.

Le **polyacide lactique** est révolutionnaire en ce sens qu'il est le premier plastique entièrement biodégradable, produit exclusivement à partir de ressources renouvelables, et qui présente des qualités semblables, voire supérieures à celles des plastiques synthétiques produits à partir de ressources fossiles. Ce dernier aspect est incontournable dans le secteur des emballages alimentaires, ceux-ci devant répondre à des normes très strictes assurant une bonne conservation du produit emballé. L'emballage doit notamment offrir une bonne résistance mécanique, thermique, une barrière aux gaz et à la vapeur d'eau, une capacité anti-buée, une bonne imprimabilité, une transparence. Leur disponibilité et leur coût sont également des facteurs importants. Sur ce dernier point, Cargill Dow est parvenue à mettre sur le marché un produit commercialement viable, grâce au coût intéressant de sa matière première, le maïs, qui constitue une ressource abondante aux Etats-Unis, et grâce à des économies d'échelles. Selon le CRIF, son coût reste toutefois de trois à quatre fois plus élevé que des polymères synthétiques comme le polyéthylène, le polypropylène, le polystyrène ou le PVC¹⁰.

⁹ CLARINVAL A.-M., MONFORT-WINDELS F. (2003), *Les polymères biodégradables*, CRIF, Seraing.

¹⁰ Ibid.

Les plastiques à base d'amidon présentent un bilan écologique très favorable, voire plus favorable que celui du polyacide lactique, et est également meilleur marché. Il a cependant l'inconvénient d'être très hydrophile et doit donc être mélangé à des plastiques synthétiques comme du polyvinylalcool pour répondre aux exigences de qualité.

ETUDE D'UN CAS D'APPLICATION INDUSTRIELLE DE LA BIOTECHNOLOGIE : LA PRODUCTION DE POLYACIDE LACTIQUE

1. METHODOLOGIE

1.1 Définition du système

Pour pouvoir discuter des impacts du polyacide lactique sur l'environnement, je comparerai le cycle de vie de celui-ci à celui d'un plastique synthétique qu'il est susceptible de concurrencer, à savoir le polystyrène standard (aussi appelé « polystyrène cristal »). Ces deux polymères présentent des caractéristiques comparables et entrent dans la fabrication d'un certain nombre de produits finis semblables (voir chapitre suivant). Une comparaison aurait également été possible avec le polyéthylène téréphtalate, qui entre dans la fabrication de bouteilles. Etant donné le recyclage très développé de ce type de produit, une substitution du polyacide lactique au polyéthylène téréphtalate est déjà beaucoup moins intéressante du point de vue de l'utilisation de matières. De plus, une analyse de cycle de vie aurait été plus compliquée dans ce cas.

Les procédés de production du polyacide lactique et du polystyrène peuvent être découpés en trois grands sous-systèmes, correspondant généralement à des installations distinctes : l'exploitation de la matière première, le transport et sa transformation. Cette dernière étape peut encore être subdivisée selon le procédé en : raffinage & craquage vs. mouture, transformation chimique vs. biotechnologique et polymérisation.



Figure 1.1 Système de production du polystyrène

Le schéma est simplifié : des étapes de transport peuvent exister entre raffinage – craquage – transformation chimique – polymérisation, et même au sein même de ces sous-systèmes arbitraires (ex : raffinage – craquage).



Figure 1.2 Système de production du polyacide lactique

Une analyse complète du cycle de vie des deux produits doit également s'intéresser aux étapes postérieures au processus de fabrication des granulés de polymère, à savoir :

- le compounding et la transformation :
 - ajout d'additifs : lubrifiants, agents de retrait, stabilisants (vis-à-vis de la chaleur, des UV, antioxydants, agents anti-microbiens), pigments, modificateurs d'impact, retardeurs de flamme, agents antistatiques, plastifiants
 - mélange éventuel avec d'autres polymères ayant des propriétés complémentaires (par exemple pour des emballages composés de deux ou plusieurs couches de plastiques)
 - formage
- l'usage du produit par l'entreprise de biens de consommation : étiquetage, remplissage (dans le cas de l'utilisation du produit comme emballage) ;
- mise sur le marché ;
- consommation ;
- élimination en fin de vie

en tenant compte des étapes de conditionnement et de transport entre chaque maillon de la chaîne.

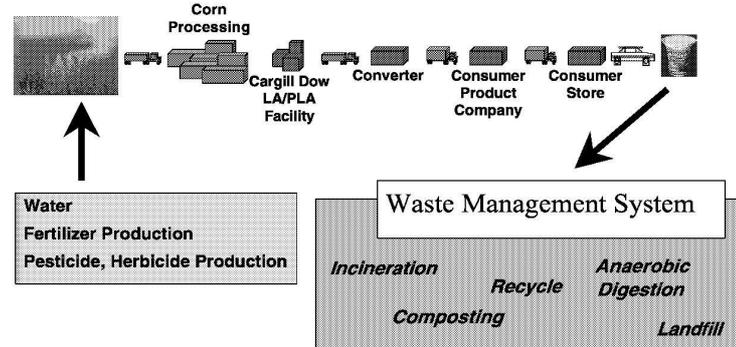


Figure 1.3 Cycle de vie du polyacide lactique (Cargill Dow)

Dans la comparaison des analyses de cycle de vie de deux produits, il faut s'assurer que les produits finaux considérés répondent à des critères comparables, concernant notamment :

- leur application : par exemple, le conditionnement d'un produit alimentaire ;
- les propriétés requises par le type d'application auquel le produit est destiné : par exemple, la résistance aux chocs, la transparence, la résistance à l'eau ;
- les contraintes de poids et de forme, qui peuvent influencer la consommation d'énergie au niveau des étapes de transport
- son influence sur les conditions d'utilisation et d'élimination.

Dans le cas de la comparaison du polyacide lactique avec le polystyrène standard, nous verrons que, globalement, les trois premières conditions sont remplies. Nous pouvons, en outre, émettre l'hypothèse que les étapes post-polymérisation des deux produits ne présentent pas de différences significatives :

- les propriétés des deux polymères permettent leur transformation en produits ayant des fonctions semblables ;
- les techniques de transformation et les quantités de résines nécessaires à fabriquer le produit final sont similaires ;
- les distances producteur-transformateur, transformateur-vendeur et vendeur-client sont arbitraires et indépendantes de la nature du polymère.

En ce qui concerne le compounding, toutefois, l'introduction d'additifs toxiques dans la composition des articles en polyacide lactique devra être évitée si le produit est destiné à être compostable. Il se peut donc que les impacts environnementaux de l'étape de compounding soient différents pour les deux plastiques étudiés. Le bilan de cette étape devrait être à l'avantage du polyacide lactique pour l'aspect toxicologique, mais d'autres paramètres comme la consommation d'énergie ou la consommation d'eau nécessiteraient une étude plus approfondie pour se prononcer. Etant donné la difficulté d'accéder à des informations sur les impacts des opérations post-polymérisation, le système étudié s'arrêtera à la production des résines.

Cependant, la teneur en carbone des polymères étudiés rend indispensable une étude du cycle de vie complet de ces produits, dans l'optique d'un bilan « gaz à effet de serre ». Au cas contraire, le bilan « émissions de gaz à effet de serre » serait négatif, ce qui porterait à croire que le système de production de polyacide lactique contribue à réduire la concentration en gaz à effet de serre de l'atmosphère. Malheureusement, les résultats disponibles des ACV « cradle to grave » ne permettent pas un lien mathématique avec l'ACV « cradle to pellet » pour les raisons suivantes :

- l'ACV « cradle to grave » et l'ACV « cradle to pellet » sont publiés dans des documents distincts émis à des dates distinctes (respectivement 2000 et 2002) ;
- l'ACV « cradle to grave » ne présente que les résultats du scénario « PLA B/WP », dont la mise en oeuvre est prévue d'ici 5 ans ;
- l'ACV « cradle to grave » ne présente pas de bilan détaillé ;
- les émissions de gaz à effet de serre sont agrégées et exprimées en kg équivalent CO₂ dans l'ACV « cradle to pellet », alors que seules les émissions de CO₂ sont prises en compte dans l'ACV « cradle to grave ». Etant donné que le scénario « PLA B/WP » utilisé dans l'ACV « cradle to grave » utilise des résidus agricoles, il est toutefois possible que les émissions de CH₄ et de N₂O liés à la culture et imputables au PLA soient ramenées à zéro, mais on peut se demander quelle est la contribution des autres opérations (combustion, compostage).

Tenant compte de ces nombreuses incertitudes quant à la fiabilité et à la cohérence de ces données, les résultats de l'ACV « cradle to grave » disponibles ne seront donc utilisés qu'à titre indicatif, pour alimenter la discussion.

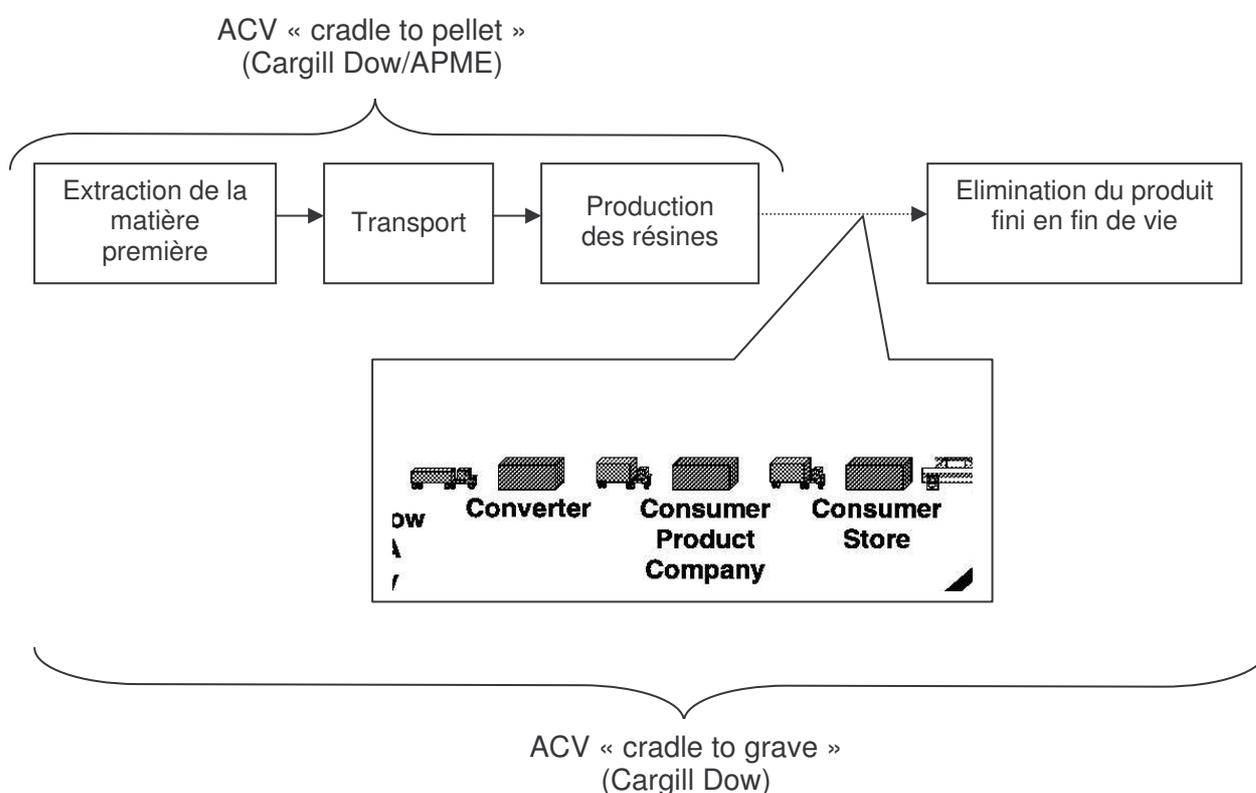


Figure 1.4 : ACV « cradle to pellet » et ACV « cradle to grave »

Le présent document n'étant pas un manuel technique, les procédés décrits ont été simplifiés à un niveau suffisant pour comprendre les impacts environnementaux en évitant de rentrer dans les détails techniques, qui n'auront pas d'intérêt dans le cadre de ma discussion.

1.2 Hypothèses de travail

Dans la mesure où des données chiffrées sont disponibles, celles-ci seront prises en compte dans l'analyse de cycle de vie. Dans la mesure du possible, elles seront exprimées par unité de polymère sous forme de granulés (1kg de polyacide lactique versus 1 kg de polystyrène), sachant que la fabrication d'un gobelet, par exemple, nécessite la même quantité de résine, qu'il soit en polyacide lactique ou en polystyrène. Ces données émanent des écoprofiles

réalisés respectivement par Cargill Dow¹¹ et par l'association européenne des producteurs de plastiques (APME)¹².

La méthodologie, le logiciel et la base de données utilisées par Cargill Dow pour son analyse de cycle de vie du polyacide lactique est celle utilisée par l'APME dans l'établissement d'écoprofiles de différentes matières plastiques et produits intermédiaires.¹³ Selon les termes de la méthodologie,

- l'énergie liée à la construction des installations et bâtiments intervenant directement ou indirectement dans la fabrication des produits ont été étudiées, aboutissant à la constatation que leur contribution dans l'écoprofil est négligeable (< 0,01% selon l'APME) en raison de leur longue durée de vie. Il s'agit par exemple de la construction de la raffinerie de pétrole, du crackeur de naphta, des installations de fabrication du styrène et du polystyrène et de la construction des tracteurs et des moissonneuses, du moulin, de l'installation de production de polyacide lactique, de la centrale électrique,...). Il y a toutefois deux exceptions : la construction des équipements pour le transport routier et l'exploitation des puits de pétrole, qui ont été inclus dans les calculs ;
- l'énergie est exprimée en pouvoir calorifique supérieur, tenant compte de la chaleur de vaporisation de l'eau. Il représente le mieux l'énergie fossile totale utilisée par le système.

De nombreux éléments de l'écoprofil – par exemple, l'absence de rejets dans l'eau ou d'émissions de méthane dans les étapes de transport – portent à croire que les données ne tiennent pas compte de situations non contrôlées, comme les fuites et les accidents. Les données publiées par l'APME sont établies sur base des informations transmises par les producteurs. Ceux-ci transmettent probablement des chiffres obtenus par des estimations basées sur un fonctionnement normal des installations. Cette hypothèse vaut également pour Cargill Dow, dont l'installation était encore en construction au moment de la réalisation de l'analyse de cycle de vie.

1.3 Difficultés méthodologiques

a) Difficultés liées à la nature des systèmes étudiés

Un certain nombre de difficultés méthodologiques se présentent, du fait des différences fondamentales dans la nature et l'origine des matières premières (agricoles vs. fossiles), les voies de production (pétrochimique vs. biochimique), et les destinées possibles des produits en fin de vie (incinération/décharge vs. compostage).

Ces divergences rendent une comparaison particulièrement délicate d'un point de vue scientifique. Il ne s'agit pas, par exemple, de comparer les flux de matière et d'énergie de deux systèmes de production de polystyrène, qui feraient tous deux appel aux mêmes matières premières et produiraient des émissions qualitativement très proches. Ce cas, qui mettrait en avant l'efficacité environnementale des technologies utilisées ou des bonnes pratiques mises en œuvre, permettrait une comparaison quantitative. Dans notre cas, par

¹¹ VINK Erwin T.H., RÁBAGO Karl R., GLASSNER David, GRUBER Patrick R. (2003), « Applications of Life Cycle Assessment to Natureworks™ Polylactide (PLA) Production », in *Polymer Degradation and Stability* 80 (2003) 403-419, Elsevier.

GRUBER Patrick R. (2000), "Commodity Polymers from Renewable Resources: Polylactic Acid", in *Carbon Management: Implications for R&D in the Chemical Sciences and Technology: A Workshop Report to the Chemical Sciences Roundtable*, The National Academy of Sciences, pp 166-184.

¹² BOUSTEAD I. (1997), *Eco-profiles of the European plastics industry – Report 4: polystyrene*, The Association of Plastics Manufacturers in Europe (APME), Brussels.

¹³ BOUSTEAD I. (1999), *Eco-profiles of Plastics and related intermediates – Methodology*, APME, Brussels.

contre, les deux systèmes étudiés engendrent des flux qualitativement très différents et donc très difficiles à confronter.

Par ailleurs, la comparaison ne porte pas sur deux procédés utilisant des technologies bien identifiées. Dans le cas du polystyrène, les flux varient d'une entreprise à l'autre, suivant les modes de production, les matières premières et intermédiaires utilisées, l'état des installations, les distances entre les installations, les moyens de transport, ...

b) Difficultés liées aux paramètres comparés

Des paramètres comme la consommation d'eau, d'énergie fossile, les émissions de gaz à effet de serre ou les émissions de substances acidifiantes admettent une comparaison objective et quantitative. Ils peuvent être ramenés à une même unité (par exemple, respectivement litres, MJ, kg équivalent CO₂, kg équivalent H⁺) et font appel à des concepts globaux comme l'épuisement des ressources, le réchauffement climatique, l'acidification. Les données relatives aux trois premiers paramètres sont facilement disponibles. Elles sont publiées par Cargill Dow dans le cas du polyacide lactique et par l'APME dans le cas du polystyrène.

Les autres paramètres, sont beaucoup plus difficiles à comparer, pour une ou plusieurs des raisons suivantes :

- ils ne peuvent pas être agrégés sous forme d'une même unité, parce qu'ils induisent des effets différents
ex : substances toxiques, déchets
- ils ont un effet à un niveau plus local
ex : demande chimique/biologique en oxygène, rejets toxiques ou la plupart des déchets solides.
Il serait incorrect de comparer ces données mathématiquement, leurs impacts dépendant de la concentration géographique des polluants et de la nature exacte de ces polluants. En effet, 100 mg d'une substance toxique aura des effets totalement différents selon qu'elle émane d'une seule source d'émission ou de plusieurs (par exemple, 100 points émettant chacun 1mg).
- les effets varient en fonction de différents facteurs
La localisation de l'entreprise, les conditions météorologiques, la fragilité de l'environnement. Par exemple, la pollution atmosphérique par le dioxyde de soufre a des conséquences beaucoup plus néfastes sur la santé lorsque les émissions sont concentrées dans une vallée sous l'effet d'un pont thermique que lorsqu'elles sont dispersées au large par le vent.

c) Difficultés liées au manque de disponibilité des données

Les entreprises sont très réticentes à dévoiler des détails sur les flux de matières, car ceux-ci peuvent révéler des informations confidentielles sur leurs procédés, qui, entre les mains de concurrents, pourraient menacer leur compétitivité. Cela vaut tant pour l'industrie du polyacide lactique que pour l'industrie du polystyrène. Les seules données quantitatives disponibles sont donc les écoprofiles du polyacide lactique et du polystyrène qui ont été publiés respectivement par Cargill Dow et par l'Association européenne des fabricants de plastique (APME). Cargill Dow limite cependant la publication de son analyse de cycle de vie aux résultats relatifs à la consommation d'énergie, aux émissions de gaz à effet de serre et à la consommation d'eau. Ces trois domaines, contrairement à la composition des effluents ou des déchets solides, ne comportent pas d'information sur les substances utilisées dans le procédé. Le polystyrène, quant à lui, présente l'avantage d'être produit par plusieurs entreprises, ce qui a permis à l'APME de publier des moyennes pour non seulement la consommation d'énergie, les émissions de gaz à effet de serre et la consommation d'eau,

mais aussi, les autres émissions dans l'air, les émissions dans l'eau, la consommation de matière première et les déchets. Les données, présentées de manière agrégées, garantissent le respect de la confidentialité des données individuelles des entreprises, mais ne permettent malheureusement pas l'identification de la contribution de chacune des étapes du procédé.

Les principales différences et similitudes entre les analyses de cycle de vie réalisées par Cargill Dow pour le polyacide lactique et par l'APME pour le polystyrène sont synthétisées dans le tableau ci-dessous.

	<u>POLYACIDE LACTIQUE</u>	<u>POLYSTYRENE</u>
Editeur	Cargill Dow	APME (association européenne des producteurs de plastique) données fournies par les producteurs
	=> neutralité des résultats ?	
Nombre de producteurs finals	1 producteur	8 producteurs
	=> données influencées directement par les particularités du système, p.ex. concentration des opérations sur le même site limite le recours aux transports	⇒ publication de données agrégées ⇒ efface les particularités (performance du procédé, mix électrique, cogénération, capacité de production, approvisionnement en matières premières, types de catalyseurs, transport,...) ⇒ perte de connaissance sur les impacts des différentes étapes
Représentativité	+/- 100% de la production de PLA (quasi monopole)	36% de la production de PS
Type de données	estimations d'ingénierie	mesures, estimations, ...
Date des données	2002	1994
		=> évolution probable depuis (ex : développement de la cogénération)
Région	Etats-Unis	Europe
	=> influence des particularités régionales : aménagement du territoire, climat, mix électricité	
Type d'ACV	« cradle to pellet »	«cradle to pellet»
	«cradle to grave» seulement pour consommation d'énergie fossile et émissions de GES pour le scénario « PLA B/WP » (prévu pour 2008) publiée en 2000 ¹⁴ , avant ACV « cradle to pellet » => problème éventuel de cohérence entre données des 2 ACV	«cradle to grave» seulement pour consommation d'énergie fossile et émissions de GES publiée par Cargill Dow en 2000

¹⁴ «Commodity Polymers from Renewable Resources: Polylactic Acid», Patrick R. Gruber, Cargill Dow LLC, in *Carbon Management : Implications for R&D in the Chemical Sciences and Technology : A Workshop Report to the Chemical Sciences Roundtable*, 2000, The National Academy of Sciences

ACV « cradle to pellet »		
Domaines	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Consommation d'énergie (distinction entre énergie fossile & énergie renouvelable) ▪ Emissions de GES (distinction graphique entre GES) ▪ Consommation d'eau (distinction graphique entre types d'utilisation) ⇨ MANQUE DE DONNEES pour : <ul style="list-style-type: none"> ▪ Utilisation de matières 1ères ▪ Emissions atmosphériques hors GES ▪ Emissions dans l'eau ▪ Déchets solides 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Consommation d'énergie (distinction entre vecteurs énergétiques) ▪ Utilisation de matières premières (distinction entre substances) y incl. eau (distinction entre types d'utilisation) ▪ Emissions atmosphériques (distinction entre substances) ▪ Emissions dans l'eau (distinction entre substances) ▪ Déchets solides (catégories larges)
Unité fonctionnelle	1 kg PLA	1 kg PS
	d'un point de vue fonctionnel, 1 kg PLA équivaut à 1 kg PS	
Sous-systèmes	consommation d'énergie : <ul style="list-style-type: none"> ▪ matière première ▪ culture (équipements d'apport d'engrais et de pesticides) ▪ culture (récolte) ▪ transport du maïs vers le moulin ▪ production du dextrose + équipements & traitement des eaux (WWT) ▪ production d'acide lactique + équipements & traitement des eaux (WWT) ▪ production de PLA + équipements & traitement des eaux (WWT) GES : pas de ss-système Eau : <ul style="list-style-type: none"> ▪ procédé ▪ refroidissement ▪ irrigation 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Production d'énergie ▪ Consommation d'énergie ▪ Transport ▪ Procédé (/matière première) (Sauf pour matière 1 ^{ère}) eau : refroidissement / procédé

ACV « cradle to grave »	
Domaines	<ul style="list-style-type: none"> ▪ utilisation de ressources énergétiques fossiles ▪ émissions de CO₂ (et non de l'ensemble des GES !)
Sous-systèmes	pas de détails
Unité fonctionnelle	1000 gobelets

Tableau 1.1 Comparaison méthodologique des ACV du PLA et du PS

Dans le cadre de la directive du 24 septembre 1996 relative à la prévention et à la réduction intégrées de la pollution, la Commission européenne organise un échange d'informations entre experts des Etats Membres, industries et organisations environnementales, devant aboutir à la publication de documents de référence sur les meilleures technologies disponibles (documents BREF) dans les différents secteurs industriels concernés par la directive. Ces

documents sont une source d'information complémentaire sur les émissions liées à certaines étapes intermédiaires des systèmes de production du polyacide lactique et du polystyrène⁷³.

Très peu d'informations sont disponibles sur les dernières étapes des procédés (production d'acide lactique et polymérisation, polymérisation du styrène, compounding, ajout d'additifs).

1.4 Présentation des données

Compte tenu de ces nombreux obstacles, mon analyse s'apparentera plutôt à une analyse de cycle de vie conceptuelle, suivant les termes de l'OCDE⁷⁴, c'est à dire une évaluation des aspects environnementaux sur base d'un inventaire limité et généralement qualitatif, présentée sous forme d'affirmations qualitatives et d'une appréciation à l'aide de points. Les impacts environnementaux seront étudiés sur base des paramètres et des critères préférentiels définis ci-dessous :

Paramètres	Critères préférentiels
consommation de matières	minimum de matières non renouvelables (car ressources limitées)
consommation d'eau	consommation minimum, mais aussi impact minimum
consommation d'énergie	minimum d'énergie fossile (car ressources limitées)
émissions de gaz à effet de serre	minimum (en équ. CO ₂)
autres émissions atmosphériques	minimum de substances toxiques ou induisant des effets d'acidification, d'eutrophisation ou de formation d'ozone troposphérique
émissions dans l'eau	minimum de rejets toxiques ou induisant des phénomènes d'eutrophisation
déchets solides	volume minimum de déchets toxiques ou de déchets non valorisables
contamination des sols	minimum de risques et minimum de toxicité
toxicologie	minimum de substances toxiques, toxicité minimale
sécurité	minimum de risques
utilisation d'espaces	occupation d'un minimum d'espace
paysages	moindre destruction du paysage, préférence pour écosystèmes naturels
biodiversité	richesse des écosystèmes

Tableau 1.2 Paramètres et critères d'appréciation

Dans un premier temps, cette approche sera utilisée pour étudier les performances environnementales du système de polyacide lactique et du système de polystyrène individuellement, en s'intéressant aux particularités de chacun des systèmes pour chacun des paramètres. Cette première phase devrait permettre d'identifier les étapes problématiques de

⁷³ IPPC (February 2003), *Reference Document on Best Available Techniques for Mineral Oil and Gas Refineries*.

IPPC (February 2003), *Draft Reference Document on Best Available Techniques in the Large Volume Organic Chemical Industry*.

IPPC (May 2003), *Draft Reference Document on Best Available Techniques in the Food, Drink and Milk Industry*.

⁷⁴ OECD (2001), *The application of biotechnology to industrial sustainability*, p.19.

ces systèmes. La phase suivante consistera à confronter les résultats des analyses des deux systèmes (ou des trois, si on considère le scénario PLA « B/WP » séparément), afin d'émettre une évaluation des impacts de l'un par rapport à l'autre.

1 ^{ère} étape												
	Extraction vs. Culture	Transport	Raffinage & craquage vs. Mouture	Transformation chimique vs. Biologique	Polymérisation	Fin de vie du produit						
Consommation de matières	<h1>Description</h1>											
Consommation d'eau												
Consommation d'énergie fossile												
Emissions de GES												
Autres émissions atmosphériques												
Emissions dans l'eau												
Déchets solides												
Contamination des sols												
Toxicologie												
Sécurité												
Utilisation d'espace												
Paysages												
Biodiversité												
2 ^{ème} étape												
							Polyacide lactique		Polystyrène			
	PLA	PLA "B/WP"										
Consom. matières 1ères non renouvelables												
Consommation d'eau												
Consommation d'énergie fossile												
Emissions de GES												
Pollution atmosphérique												
Emissions dans l'eau												
Déchets solides												
Contamination des sols												
Toxicologie												
Sécurité												
Paysages												
Utilisation d'espace												
Biodiversité												

Cette grille d'appréciation sera complétée selon une échelle de valeurs de ++ à --.

++	+	0	-	--	
←					→
très bonne	bonne	neutre	mauvaise	très mauvaise	

Tableau 1.3 Procédure d'évaluation des performances environnementales de la production du polyacide lactique par rapport à la production de polystyrène

2. PRODUCTION DU POLYACIDE LACTIQUE : ANALYSE DE CYCLE DE VIE

2.1 Propriétés du polyacide lactique

Le polyacide lactique est un polymère très versatile. L'acide lactique est produit sous deux formes optiques différentes : L et D. En variant la proportion et la séquence des deux isomères au sein du polymère, on peut contrôler les propriétés du produit, notamment le comportement de fusion, les propriétés thermiques, les propriétés de barrière et la ductilité. Cela explique le large éventail d'applications des produits en polyacide lactique et, par conséquent, le grand nombre de plastiques qu'il pourrait concurrencer : polyéthylène téréphtalate (bouteilles de boisson), polystyrène (pièces rigides), cellophane (films d'emballage), polyéthylène (films, ...), polypropylène (récipients thermoformés). Il est même utilisé dans le domaine des fibres textiles.

Ses propriétés et ses applications sont synthétisées dans le tableau ci-dessous, en vis-à-vis du polystyrène standard⁷⁵ : (voir aussi illustrations en annexes 1 et 2)

	Polyacide lactique	Polystyrène standard
Caractéristiques +	grande transparence et brillance rigidité faculté de conserver les plis et les torsions bonne barrière aux odeurs résistance aux graisses scellage à faible température impression facile dégage peu de fumées à la combustion résistance aux UV bon coefficient d'élasticité	transparence possible et brillance rigidité bonne stabilité dimensionnelle bon isolant thermique tenue aux climats tropicaux facilité de moulage (large intervalle de T° et faible retrait) collage et décoration aisés soudure par ultrasons facile
	- fragilité faible tenue thermique (max. 50-60°C) faible stabilité à long terme (tendance à l'hydrolyse en présence d'eau)	fragilité faible tenue thermique (60-78°C) combustible (avec fumée noire) très électrostatique grande sensibilité aux solvants soufflage difficile
Applications	plateaux et couvercles à courte durée de vie récipients opaques pour produits laitiers gobelets pour boissons fraîches films d'emballages, fenêtres d'enveloppes bouteilles de lait et d'huile fibres textiles (vêtements, produits d'hygiène, draps, carpettes, ...) rembourrage (coussins, matras, édredons, ...) mousses de protection dans les emballages	emballages: pots de yaourts, barquettes thermoformées gobelets à boissons jouets talons de chaussure pinces à linge

⁷⁵ Sources :

- CLARINVAL A.-M., MONFORT-WINDELS F. (2003), *Les polymères biodégradables*, CRIF, Seraing.
- DOBRACZYNSKI Alexandre, PIPERAUD Michel, TROTIGNON Jean-Pierre, VERDU Jacques. (1982), *Les matières plastiques – structures, propriétés, mise en œuvre, normes*, CEP Edition, Paris.
- REYNE Maurice (1998), *Les plastiques*, Presses Universitaires de France, Paris.
- SÖDERGARD A., "Lactic Acid Based Polymers for Packaging Materials for the Food Industry", in *Proceedings of the Food Biopack Conference*, Copenhagen, 27-29 August 2000.

Tableau 2.1 Propriétés et applications du polyacide lactique et du polystyrène

Sa fragilité peut exiger l'addition de plastifiants pour certaines applications. Dans ce cas, les additifs doivent être biodégradables pour que le produit final soit admis au compostage.

En raison de la moindre résistance du polyacide lactique à la chaleur, en regard des plastiques traditionnels, et de sa faible stabilité à long terme, A. Södergard (*op.cit.*) suggère que les applications les plus prometteuses du polyacide lactique, dans les matériaux d'emballage, sont les emballages de produits réfrigérés à durée de vie limitée, par exemple les produits laitiers.

2.2 Marché du polyacide lactique

La commercialisation de plastiques à base de polyacide lactique est très récente. Elle a été rendue possible par le développement d'un nouveau procédé biotechnologique performant par Cargill Dow, une joint venture 50%-50% établie en 1997 par Cargill, qui commercialise, produit et distribue des produits agricoles, alimentaires, financiers et industriels, et Dow Chemical, un fabricant de produits chimiques, plastiques et agricoles choisi par Cargill pour son expertise scientifique et technologique. La technologie mise au point grâce à cette union est protégée par un brevet et Cargill Dow est encore de très loin le leader mondial. Cargill Dow a développé deux marques : NatureWorks™, qui couvre une large gamme de produits d'emballages (films, barquettes, gobelets, bouteilles,...), et Ingeo™ dans le domaine des fibres (carpettes, vêtements, couvertures,...). Ses gobelets jetables ont été notamment utilisés aux Jeux Olympiques d'hiver de Salt Lake City en 2002. Début 2000, avant-même que l'installation de Blair ne démarre, plusieurs leaders du marché international, parmi lesquels Autobar Group Ltd., BIMO ITALIA S.p.A., Cascades, Constantia AG, FIT, Interface, Kanebo, Kuraray, Mitsubishi Plastics, Tetrapack, Trespaphan GmbH, Unifi, Unitika et Woolmark Company Ltd., s'étaient déjà engagés envers le développement de produits à partir du PLA NatureWorks.⁷⁶

Les applications du polyacide lactique s'étendent encore plus loin que celles citées plus haut, puisque Sony prévoyait d'introduire sur le marché, en automne 2002, un walkman dont le boîtier est produit à 90% à base de polyacide lactique. Fujitsu prévoit d'utiliser le même plastique dans le boîtier de ses ordinateurs portables.⁷⁷

En Belgique, la firme Galactic, producteur d'acide lactique à partir de mélasses de betteraves, produit du polyacide lactique à petite échelle, à titre expérimental, en attendant que le marché s'agrandisse.

En France, des recherches sont menées conjointement par l'Institut de recherche pour le développement, la Société des Sucrieries et Raffineries d'Erstein et le Centre de recherche sur les biopolymères artificiels, pour étudier la transformation de saccharose, extrait de betteraves, en polyacide lactique en vue d'une éventuelle commercialisation de plastiques biodégradables (emballages, films agricoles)⁷⁸.

Outre les qualités intrinsèques du produit et sa versatilité, une grande part du succès commercial de NatureWorks repose sur son origine végétale et sur sa biodégradabilité. Ces deux particularités en font un produit original qui plait à un public de plus en plus soucieux de l'environnement. Dans ses communications, Cargill Dow met d'ailleurs l'accent sur la durabilité (« sustainability ») de son produit. Cependant, il ne suffit pas de produire un produit

⁷⁶ OHMAN John, « Les plastiques à base de sucres végétaux deviennent une réalité mondiale », Cargill Dow Polymers, New York, communiqué de presse, 11 janvier 2000.

⁷⁷ BELSON Ken (2002), "Using Corn-Based Plastic, A Laptop Starts to Go Green", in *The New York Times*, 18 July 2002.

⁷⁸ IRD, « Prix partenaires d'entreprises ANVAR-France Info : le laboratoire de microbiologie de l'IRD, Marseille, lauréat du Prix Recherche-Innovation 2001 », communiqué de presse, 23 octobre 2001.

à partir de plantes, pour pouvoir prétendre s'inscrire dans le concept du développement durable. Les impacts environnementaux de la production elle-même doivent être étudiés. Cargill Dow en est conscient et a publié une analyse de cycle de vie⁷⁹ comparant le polyacide lactique à des polymères synthétiques ayant des fonctions identiques, sur trois critères : la consommation d'énergie, les émissions de gaz à effet de serre et la consommation d'eau.

L'analyse de cycle de vie sert à l'entreprise

- à mesurer la durabilité environnementale d'un procédé ou d'un produit et de le comparer éventuellement à des procédés ou des produits alternatifs – les produits comparés doivent toutefois remplir des fonctions identiques ;
- à identifier les gisements d'amélioration afin d'augmenter continuellement la performance du procédé;
- d'outil de communication vis-à-vis des stakeholders ;
- à augmenter la transparence de l'entreprise.

L'écoprofil prend en compte l'énergie liée à la mise en œuvre des fournitures, comme les eaux de procédé, les eaux de refroidissement, l'azote, l'air comprimé, les catalyseurs, les stabilisants et les produits chimiques, de même que le traitement des eaux.

⁷⁹ VINK Erwin T.H., RÁBAGO Karl R., GLASSNER David, GRUBER Patrick R. (2003), « Applications of Life Cycle Assessment to NatureworksTM Polylactide (PLA) Production », in *Polymer Degradation and Stability* 80 (2003) 403-419, Elsevier.

2.3 Description du système de production

vert : flux solides

rouge : flux atmosphériques

bleu : flux liquides

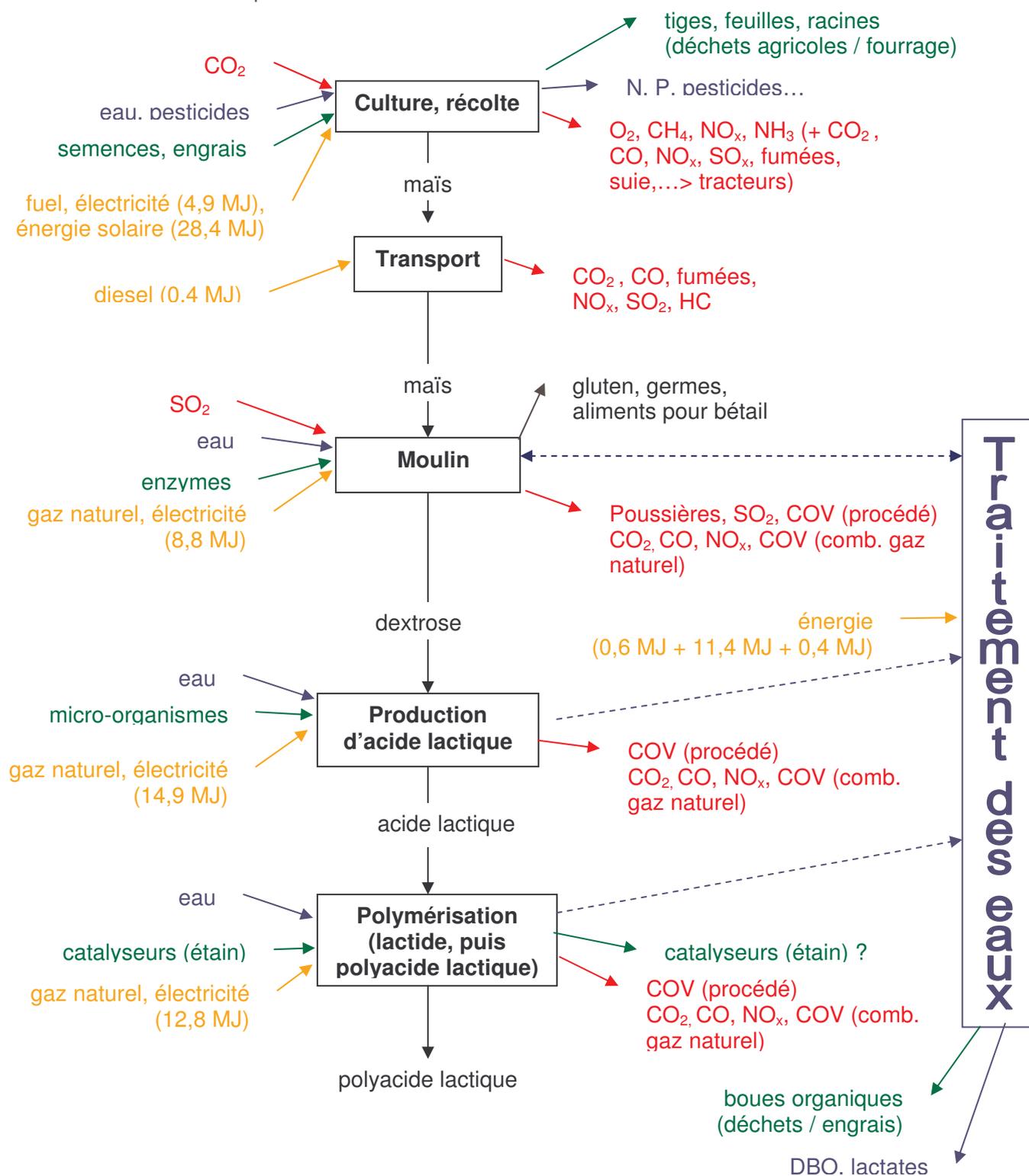


Figure 2.1 Diagramme des flux du système de production de polyacide lactique

Culture : Actuellement, le procédé de Cargill Dow est basé sur l'utilisation de maïs comme matière première. C'est, aux Etats-Unis, la source d'amidon la moins chère et la plus abondante. Aux Etats-Unis, 20 à 30% du maïs est génétiquement modifié⁸⁰.

Au cours de la photosynthèse, les plantes de maïs absorbent du CO₂ et le transforment en sucre. Une partie de ce sucre est stocké dans les graines de maïs sous forme d'amidon. C'est cette partie de la plante qui est utilisée dans la production du plastique.

La culture du maïs requière des terres cultivables, des graines, des apports en eau, en engrais et en pesticides (herbicides et insecticides).

Arrivés à maturité, les épis de maïs sont récoltés, tandis que les autres parties des plantes (tiges, feuilles, racines) sont utilisés comme fourrage pour le bétail ou sont abandonnés sur les champs.

Transport : Le maïs récolté est transporté vers le moulin. C'est la seule étape de transport prise en compte dans l'analyse de cycle de vie, toutes les étapes postérieures du système étudié se faisant sur le même site (moulin, installations de production d'acide lactique et de polyacide lactique).

Moulin : C'est dans cette installation que se font toutes les étapes de transformation du maïs en dextrose. Seule une partie des graines de maïs, l'amidon, peut être transformée en dextrose. Les autres composantes (gluten, germes, ...) entrent principalement dans la production de produits alimentaires ou non alimentaires (huile de maïs, farine de gluten, aliment pour animaux à base de gluten, amidon et dérivés).

Le procédé de mouture humide se décompose comme suit :

- nettoyage et inspection du maïs : nettoyage mécanique sur tamis et par jets d'air, pour enlever les impuretés
- trempage : on laisse tremper les grains de maïs pendant 28 à 48 heures dans des cuves remplies d'eau portée à une température de 52°C, pour qu'ils ramollissent. L'ajout de dioxyde de soufre (0,1 à 0,2%) facilite le brisement des ponts disulfure de la matrice protéinique du noyau de maïs, préparant ainsi l'étape suivante, qui consistera en la séparation des différents constituants du noyau. Il ralentit aussi la prolifération bactérienne.
- séparation du germe : le maïs est moulu grossièrement pour détacher le germe des autres composants, puis il est passé dans un cyclone, qui sépare le germe, plus léger, du reste. Les germes contiennent environ 85% de l'huile du maïs. Cette huile est extraite par des procédés mécaniques et des solvants, puis raffinée et filtrée pour être utilisée dans le domaine alimentaire. Les résidus du germe sont récupérés comme ingrédient pour la nourriture animale.
- broyage fin et criblage : un second broyage, plus fin, détache l'amidon et le gluten des fibres du noyau. Des tamis retiennent les fibres, tout en laissant passer l'amidon et le gluten. Ces fibres seront utilisées dans l'alimentation animale.
- séparation de l'amidon : le mélange d'amidon et de gluten passe dans une centrifugeuse, qui sépare les deux constituants du fait de leur densité différente. Le gluten sera utilisé dans l'alimentation animale. L'amidon est dilué et lavé à plusieurs reprises pour éliminer les dernières traces de

⁸⁰ Communication personnelle d'E. Vink, Cargill Dow, le 23 avril 2003.

protéines. Il sera soit vendu sur le marché comme amidon non modifié, soit modifié pour être vendu comme spécialité (par exemple comme liant pour la papeterie), soit, en majeure partie, transformé en sirops et en dextrose.

- conversion de l'amidon en dextrose : hydrolyse enzymatique. Le procédé peut être arrêté plus tôt, pour produire des sirops légèrement ou moyennement sucrés. Le dextrose peut également être fermenté en présence de levures pour produire de l'alcool.

Le raffinage du maïs est donc une activité très diversifiée et intégrée. Les produits qui en sont issus sont nombreux (gluten, acides aminés, éthanol, huile, amidon, dextrose, polyols,...) et trouvent de multiples applications (aliments pour bétail, friandises et snacks, sirops, boissons, médicaments, dentifrice, margarine, produits laitiers, conserves, tannerie, agents lubrifiants, plastiques, papeterie, colles, textiles, ...).

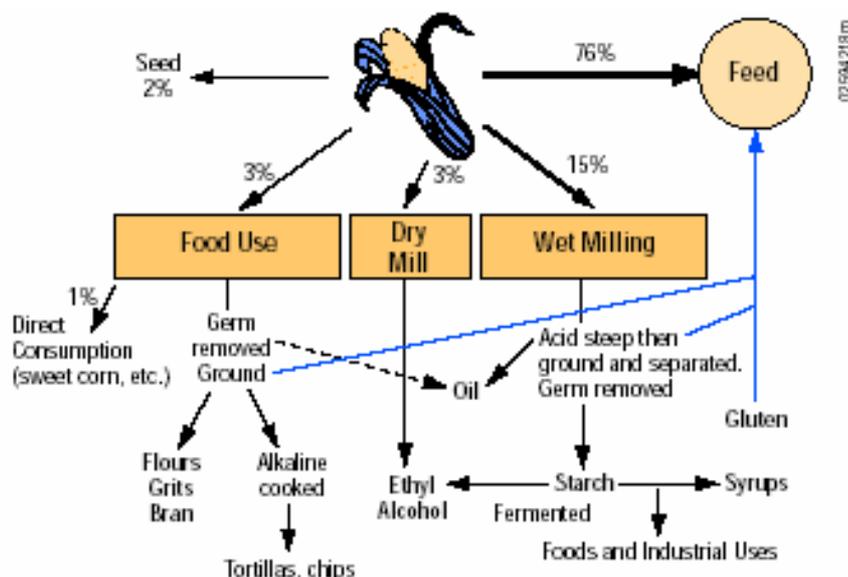


Figure 2.2 Produits de la culture et du raffinage du maïs aux USA
(The technology roadmap for plant/crop-based renewable resources 2020)

Production d'acide lactique :

Sous l'action de micro-organismes (*Lactobacillus*), le dextrose est transformé, à pH presque neutre, en acide lactique (fermentation). Les sels de lactate subissent des étapes de purification pour donner de l'acide lactique.

L'acide lactique a des applications dans des domaines variés : alimentaire (comme arôme, antimicrobien, source de calcium ou régulateur de pH dans les sauces, poissons, produits laitiers, viandes, fruits et légumes, friandises, boissons,), industriel (comme agent complexant, solvant, détergent ou matière première dans les adhésifs, les peintures, l'électronique, les industries du papier et du textile, la synthèse de pesticides), cosmétique (comme humectant, agent de rajeunissement de la peau, régulateur de pH, antimicrobien dans les crèmes de soin de la peau, les savons et gels douche, les shampoings, les dentifrices), pharmaceutique (comme transporteur de sodium dans les solutions parentérales, comme supplément minéral dans le traitement de l'ostéoporose, des pressions artérielles élevées ou des cancers du colon ou pour une cure de magnésium, de fer ou de zinc ou encore comme matière première dans la synthèse de médicaments)⁸¹.

⁸¹ Source : Galactic, <http://www.lactic.com>.

Production de polyacide lactique :

Les molécules d'acide lactique se scindent sous l'effet de la chaleur et s'assemblent en anneaux, les monomères de lactide. Le mélange de lactides est purifié par distillation sous vide. Sous l'action de catalyseurs d'octoate d'étain, les anneaux de lactide s'ouvrent et s'alignent pour former des chaînes de polymère, le polyacide lactique. Ce processus se déroule à une température de 180 à 210 °C, à des concentrations d'octoates d'étain de 100 à 1000 ppm, pendant 2 à 5h pour une conversion de 95%. L'utilisation d'étain comme catalyseur évite l'utilisation de solvants organiques. Les monomères non polymérisés sont récupérés et réinjectés au début du procédé. Le polyacide lactique est transformé en granulés.

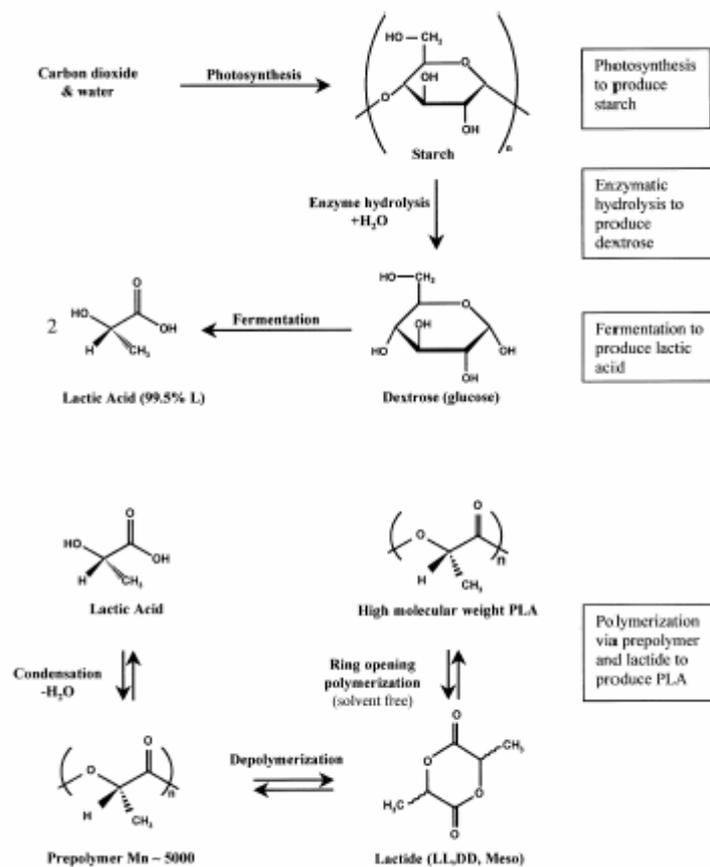


Figure 2.3 Schéma de réaction du polyacide lactique (Cargill Dow)

2.4 Potentiel d'amélioration du procédé

Le procédé développé par Cargill Dow est encore à ses débuts. Des découvertes intéressantes sont attendues ou viennent d'être réalisées dans le domaine de la biotechnologie, plus particulièrement dans la recherche et le développement de nouveaux biocatalyseurs, qui pourraient encore accroître les performances économiques et environnementales du procédé.

Dans l'industrie transformatrice du maïs, Patrick Simms, de la firme Diversa Corporation, une entreprise de biotechnologie, prévoit s'attend à une amélioration de l'efficacité des techniques de séparation, une optimisation de la conversion de l'amidon, qui devraient être possibles par la découverte ou la création de nouvelles enzymes et/ou par manipulation génétique du maïs en vue de modifier la composition des grains.⁸²

Aux USA, un procédé appelé « mouture enzymatique du maïs » développé récemment permet déjà d'éliminer l'utilisation de dioxyde de soufre pendant le trempage tout en conservant le même rendement. L'utilisation de protéases permettrait en outre de réduire le temps du trempage de 70%, ce qui rend possible une augmentation considérable de la capacité de production, des économies d'énergie substantielles et une réduction de la consommation d'eau⁸³.

Les progrès en matière de biocatalyseurs laissent également entrevoir un potentiel d'amélioration important pour l'étape de polymérisation. En témoigne le cas de Baxenden Chemicals, en Angleterre, qui a développé un bioprocédé utilisant une enzyme lipase issue d'une levure pour catalyser la réaction de polymérisation de ses polyesters. Non seulement le biocatalyseur remplace les catalyseurs en titane ou en étain utilisés dans le procédé chimique conventionnel et permet d'éviter l'utilisation de solvants et d'acides inorganiques, mais il permet aussi de baisser la température du procédé de 200 °C, dans le cas du procédé chimique, à 60-100 °C, ce qui constitue une économie en énergie de 2000 MWh par an dans le cas de Baxenden⁸⁴. Il est intéressant de noter que l'intérêt de l'entreprise pour le développement de ce nouveau procédé résidait davantage dans les bénéfices économiques que dans l'aspect environnemental. Lorsqu'abordé sur la question d'un éventuel potentiel semblable dans le cas de la polymérisation de l'acide lactique, Cargill Dow reste discret et répond qu'il « pense que la polymérisation enzymatique est possible et qu'elle représente une future technologie de production »⁸⁵.

Cargill Dow s'est fixé un objectif à long terme très ambitieux : éliminer l'usage de ressources d'énergie fossile et les émissions de CO₂ qui y sont liées. Dans cette optique, s'aidant de son analyse de cycle de vie, Cargill Dow prévoit, d'ici 5 à 8 ans, d'apporter des améliorations majeures à son procédé, via :

- l'utilisation, comme matière première, des résidus agricoles (tiges, paille, feuilles, ...) de plants de maïs et d'autres cultures au lieu ou en plus des grains de maïs ;
- la conversion de la cellulose en sucres, la lignine étant brûlée ou gazéifiée pour produire de la vapeur ;
- l'optimisation du procédé de production d'acide lactique ;
- l'utilisation d'énergie éolienne ;
- l'optimisation de la transformation de l'acide lactique en lactide et de la polymérisation.

Ce nouveau procédé, dont les impacts seront étudiés plus loin, a été appelé « PLA B/WP » (B= biomass ; WP=windpower) .

⁸² SIMMS Patrick (2002), « Impacts of biotechnology on the starch processing industry », in *Proceedings from 2002 Planning Committee Conference*.

⁸³ SINGH Vijay, JOHNSTON David B. (2002), "Enzymatic Milling Process", in *Proceedings from the 2002 Planning Committee of the Corn Refiners Association*.

⁸⁴ OECD (2001), *The application of biotechnology to industrial sustainability*.

⁸⁵ Communication d'Erwin Vink, Cargill Dow, par courrier électronique, le 23 avril 2003.

2.5 Fin de vie des produits en polyacide lactique

Arrivés en fin de vie, les articles en polyacide lactique admettent les mêmes méthodes de traitement que les plastiques synthétiques, c'est-à-dire principalement les voies suivantes : l'incinération, la mise en décharge et le recyclage. En raison de sa biodégradabilité, il offre cependant une alternative intéressante : le compostage.

La dégradation du polyacide lactique n'est possible qu'à partir d'une certaine température, humidité et activité microbienne. Dans des conditions de stockage et d'utilisation normales, les produits en polyacide lactique sont stables. La dégradation du produit se fait par hydrolyse, catalysée par la chaleur, et est suivie de l'action de bactéries qui décomposent les fragments résiduels en dioxyde de carbone, en eau et en humus. La biodégradation, dans un compost maintenu à une température de 60 °C dure environ 40 jours.⁸⁶

2.6 Facteurs de pression environnementale

a. Consommation de matières

Les principales matières entrantes du système sont :

- les semences de maïs
- les engrais : 300 à 600 kg/ha⁸⁷ = 100 à 200 g/kg PLA
- les pesticides : +/- 2,2 kg/ha⁸⁸ = 740 mg/kg PLA
- l'eau : +/- 50 kg/kg PLA
- SO₂
- étain
- enzymes
- micro-organismes

Aux Etats-Unis, le maïs est la source de sucre la moins chère et la plus abondante. Avec une production annuelle d'environ 253 millions de tonnes, les Etats-Unis sont responsables de 40% de la production mondiale de maïs. Une production de 500.000 tonnes de PLA nécessiterait moins de 0,5% des récoltes annuelles de maïs aux USA.⁸⁹

Dans d'autres pays, d'autres sources d'amidon peuvent également servir de matière première, par exemple le riz, la betterave sucrière, la canne à sucre, la pomme de terre, le blé.

En Europe, le maïs, qui était la première source d'approvisionnement de l'amidonnerie en 1981/1982, avec 4 Mt, était devenue, en 1995/96, la deuxième source, avec 5,8 Mt, après la pomme de terre, qui a vu sa part évoluer de 3,6 Mt à 7Mt. Le blé a quant à lui augmenté sa part de 0,4 Mt à 3,3 Mt dans la même période.

L'acide lactique est également produit à partir du saccharose. Galactic, situé à Escanaffles, en Belgique, base sa production d'acide lactique sur la betterave. Le projet mené par l'IRD, en France, tire également sa matière première de la betterave.

⁸⁶ GRUBER Patrick R. (2000), "Commodity Polymers from Renewable Resources: Polylactic Acid", in *Carbon Management: Implications for R&D in the Chemical Sciences and Technology: A Workshop Report to the Chemical Sciences Roundtable*, The National Academy of Sciences, pp 166-184.

⁸⁷ fourchette entre pratiques optimales et surfertilisation dans la plaine du Pô, citée par X. Poux dans POUX Xavier (2000), *L'impact environnemental de la culture du maïs dans l'Union Européenne : options pratiques pour l'amélioration des impacts environnementaux*, Rapport de synthèse.

⁸⁸ consommation moyenne de matière active, citée par X. Poux d'une étude italienne, *op.cit.*

⁸⁹ GRUBER Patrick, O'BRIEN Micheal (2002), "Polylactides 'NatureWorks™ PLA'", in: DOI Y., STEINBÜCHEL A. , editors (2002), *Biopolymers in 10 volumes*, volume 4, polyesters III applications and commercialisation products, Weinheim: Wile-VCH, pp. 235-249.

D'après Galactic, la production de 390.000 tonnes de polyacide lactique en 2008 nécessiterait une surface de 70.000 ha, 187.000 ha ou 121.000 ha de champs suivant le type de culture : respectivement la betterave sucrière, le blé et le maïs. Toujours selon Galactic, ces superficies correspondraient à respectivement 3,3%, 1,9% ou 2,9% des terres utilisées par ces trois cultures dans l'Europe des 15.

	Sugar beet	Wheat	Corn
Harvested area (.000 ha) Year 1996			
• EUR 15	2 108	9 774	7 174
• EUR 12	1 961	-	3 995
Area needed for PLA	70.2	187.2	120.9
Production (.000 tons) Year 1996			
• EUR 15	112 250	67 915	35 466
• EUR 12	105 792	-	33 730
Volume needed for PLA	3 738	1 318	1 014
Turnover (prices : Nov. 1998)			
• prices (Euro/ton)	42.14	116.51	136.55
• turnover (millions Euro)	157.53	153.56	138.46

Tableau 2.2 : Cultures de betterave, de blé et de maïs dans l'UE (Galactic)

De plus, une étude publiée par la Commission européenne⁹⁰, citée par Galactic, évaluerait à 25% les terres agricoles qui ne seront bientôt plus nécessaires pour produire des biens alimentaires, soit 30 millions ha. Dans ce cas, la production de plastiques à partir de biomasse offrirait une solution pour maintenir le secteur agricole européen en vie, tout en réduisant la dépendance de l'UE des importations de pétrole pour la production de plastiques. En Belgique, la sucrerie d'Escanaffles, dans le Hainaut, est directement concernée par la menace que font planer les quotas de production de sucre imposés par la politique agricole de l'Union européenne. Si l'acide lactique est déjà largement utilisé dans le domaine alimentaire et dans les cosmétiques, le développement du marché du polyacide lactique lui ouvrirait des perspectives supplémentaires. Sur un plan plus général, la transformation de produits agricoles à des fins non alimentaires pourrait contribuer à sauvegarder l'activité agricole et agro-industrielle de certaines régions rurales, par la valorisation de productions agricoles. Cela fait d'ailleurs partie de l'objectif d'Agro Food Valley, en Hainaut occidental, une initiative qui vise le développement économique, scientifique et technologique de cette région particulièrement riche en entreprises agricoles et agroalimentaires.

L'utilisation de ressources alimentaires pour la fabrication de plastiques fait l'objet de considérations éthiques, compte tenu des famines régnant dans le monde. Toutefois, le problème de famine n'est pas lié à un manque de nourriture à l'échelon mondial et est plus une problématique géographique ou économique. Par ailleurs, une part déjà bien plus importante des cultures sert à nourrir le bétail sans que cela semble soulever des polémiques. Il faut savoir qu'en moyenne Europe (Autriche, France, Allemagne, Belgique, Luxembourg, Pays-Bas, Irlande, Royaume-Uni, Suisse), 55 millions de tonnes fraîches par an sont utilisées pour la consommation humaine, 51 millions pour l'alimentation du bétail destiné à la

⁹⁰ *Study on Production of Thermo-Bioplastics and Fibres based mainly on Biological Materials*, European Commission, DG XII, June 1994, cité par Galactic dans: GALACTIC LABORATORIES, "Biopolymers as viable alternatives to common plastics materials (with special emphasis on PLA used for packaging applications)", <http://www.lactic.com>.

production de viande, et seulement 10,5 millions pour diverses applications industrielles⁹¹. Quoi qu'il en soit, le développement d'une nouvelle technologie, qui substituerait les résidus agricoles (paille, fourrage, bagasse) au maïs, comme matière première pour la production de polyacide lactique, devrait supprimer ce problème.

Procédé « PLA B/WP »

Cette conversion aurait au moins deux grands avantages :

- elle évite d'utiliser des ressources alimentaires ;
- elle valorise des déchets.

L'utilisation des résidus agricoles, comme les tiges, feuilles et autres parties non utilisées des plantes de maïs ou d'autres cultures permet, par ailleurs:

- d'éviter d'accroître les cultures de maïs et les effets néfastes liés à une monoculture intensive : déséquilibre hydrique, dégradation du paysage, pollution aquatique par les engrais et les pesticides, atteinte à la biodiversité, érosion des sols;
- d'éviter des émissions supplémentaires de méthane, liées à l'utilisation d'engrais et à la décomposition des déchets agricoles. Le méthane a un pouvoir de réchauffement 21 fois supérieur au CO₂. Bien qu'émis en faible quantité par rapport au CO₂, sa contribution au bilan d'émissions de gaz à effet de serre de la production du polyacide lactique n'est pas du tout négligeable. Dans la nouvelle génération de production de polyacide lactique, la cellulose et l'hémicellulose seront convertis en sucre, et la lignine sera brûlée ou gazéifiée pour produire de la vapeur. Dans ce cas, la plante en fin de vie, c'est à dire une fois récoltée, libérera donc moins de gaz à effet de serre dans l'atmosphère puisqu'une plus grande quantité de carbone de la plante est utilisée.

Ce procédé n'est pas encore rentable, car les étapes de purification sont longues et coûteuses. Toutefois, les recherches se poursuivent pour l'améliorer. Ainsi, une étude danoise a démontré la possibilité de produire de l'acide lactique par fermentation de jus issu notamment de la production de bottes de fourrage pour le bétail, en présence de résidus pommes de terre hydrolysés par une enzyme⁹². Selon les termes de l'étude, l'utilisation de résidus hémicellulosiques pour la production d'acide lactique au Danemark serait prometteuse. Elle présente l'avantage de disposer de matières premières bon marché et facilement disponibles, puisqu'il s'agit de résidus agricoles. Elle offre, en outre, une solution à la menace environnementale que constituent les jus rejetés dans le milieu. Il faut toutefois signaler un bémol : une utilisation massive de résidus agricoles à des fins industrielles pourrait entrer en conflit avec la bonne pratique agricole consistant à laisser les résidus des récoltes en surface, qui permet de limiter le lessivage des sols⁹³.

Le laboratoire national d'Argonne, en Illinois, mène des recherches dans la conversion de déchets de l'industrie agro-alimentaire, principalement l'amidon provenant de l'industrie de la transformation de la pomme de terre et du maïs, en acide lactique

En moyenne Europe, les quantités de résidus de récolte disponibles ont été évaluées à 76,5 millions de tonnes (matière sèche) par an. Les principales cultures entrant en ligne de compte sont : le blé (34,2 Mt) et le maïs (20,7 Mt). Ils sont suivis de loin par le colza (7,4 Mt), la betterave sucrière (6,3 Mt), le tournesol (6,2 Mt) et la pomme de terre (2,1 Mt).

⁹¹ DIAMANTIDIS Nick D., KOUKIOS Emmanuel G. (2000), "Agricultural crops and residues as feedstocks for non-food products in Western Europe", in *Industrial Crops and Products*, 11 (2000), pp. 97-106, Elsevier Science.

⁹² GARDE A., SCHMIDT A.S., JONSSON G., ANDERSEN M., THOMSEN A.B., AHRING B.K., KIEL P. (2000), "Agricultural Crops and Residuals as a Basis for Polylactate Production in Denmark", in *Proceedings of the Food Biopack Conference*, Copenhagen, 27-29 August 2000.

⁹³ WATSON Stanley A., RAMSTAD Paul E. (1987), *Corn Chemistry and Technology*, American Association of Cereal Chemists Inc., St. Paul, Minnesota.

Même si l'Europe a actuellement atteint un certain degré d'autosuffisance en terme de produits agricoles, suite à sa politique agricole commune encourageant le modèle de culture intensive, et même si les rendements devraient continuer à augmenter progressivement grâce aux progrès des méthodes de culture et aux progrès biotechnologiques, les surfaces agricoles disponibles sont malgré tout limitées. De plus, on assiste à un développement d'applications industrielles basées sur l'utilisation de matières renouvelables : plastiques, adhésifs, fibres, lubrifiants, encres, solvants, peintures, cosmétiques, médicaments, et non des moindres, les biocarburants. Si cette évolution se poursuit, ces applications pourraient entrer en compétition en matière d'approvisionnement, surtout si l'utilisation de biocarburants venait à se développer.

Outre les contraintes d'espace, la sécurité d'approvisionnement est menacée par les aléas biogéoclimatiques. Les cultures sont très sensibles aux conditions climatiques, une tempête, un incendie, une inondation pouvant anéantir un champs extrêmement rapidement et sans qu'aucune mesure ne puisse être prise. Les maladies et les ravageurs constituent également un facteur de risque important.

b. Consommation d'eau

Le système de production de polyacide lactique utilisé actuellement consomme de grandes quantités d'eau (50 kg d'eau par kg de polymère). Dans le cas de l'usine de Cargill Dow, l'eau provient de la rivière Missouri.

IRRIGATION :

L'analyse de cycle de vie publiée par Cargill Dow révèle que l'eau d'irrigation constitue plus d'un tiers de la consommation totale d'eau du système. Le taux d'irrigation peut dépendre des conditions climatiques de la région. Le maïs est toutefois une culture connue pour sa sensibilité au stress hydrique. Plus particulièrement au stade de fécondation et de floraison, un déficit en eau limite le nombre d'épis par plante et le nombre de grains par épis, réduisant les rendements de 50 à 60% de leur potentiel. Face à l'importance des pertes potentielles liées à un déficit hydrique, les économies réalisées par une gestion plus économe en eau ne font pas le poids. L'irrigation représente moins de 12% des charges opérationnelles (Source : ONIC, 1995, citée par X. Poux).

Les prélèvements d'eau aux fins des cultures irriguées peuvent avoir des effets particulièrement néfastes dans des zones sensibles, sachant que ces prélèvements ont lieu en période estivale : ils contribuent à épuiser les nappes aquifères et menacent la faune et la flore aquatique, qui doit déjà faire face au régime d'étiage. De plus, les polluants déversés dans ces eaux se retrouvent moins dilués qu'en temps normal. Par ailleurs, la technique d'irrigation engendre des risques accrus d'érosion et d'entraînement de l'azote et des pesticides dans les eaux.

PROCEDE

Les eaux utilisées par les installations de transformation du maïs en polyacide lactique constituent les deux tiers de la consommation en eau du système. Il s'agit principalement d'eaux de procédé. Les eaux de refroidissement constituent une part infime.

▪ Moulin

L'eau résiduaire issue des différentes étapes de séparation des composants du maïs est récupérée pour être réutilisée dans le procédé ou dans la production d'aliments pour bétail.

▪ Installation de production d'acide lactique

Cette étape est également très gourmande en eau. Le système d'approvisionnement en eau tourne en boucle fermée. En raison des exigences de qualité du produit, la réutilisation d'eau recyclée n'est pas possible à toutes les étapes.

Pour des raisons de confidentialité, les consommations spécifiques d'eau des différentes étapes du système ne sont pas dévoilées dans l'analyse de cycle de vie de Cargill Dow.

La concentration des étapes consommatrices d'eau du système dans une aire géographique restreinte (champs, moulin, installation d'acide lactique et de PLA), a pour effet d'exacerber les risques liés à l'assèchement décrits plus haut.

Procédé « PLA B/WP »

Le nouveau procédé basé sur l'utilisation de biomasse devrait résoudre la problématique de l'irrigation. En contrepartie, la consommation en eau des procédés sera plus importante.

c. Consommation énergétique

Le tableau ci-dessous présente les flux énergétiques du système :

Procédé	Quantité nécessaire (MJ) pour produire 1kg PLA	% énergie fossile
Application des engrais, pesticides, ...	3,8	7,0%
Exploitation agricole	1,1	2,0%
Transport du maïs au moulin	0,4	0,7%
Electricité et fuels – fabrication du dextrose	8,8	16,3%
Energie des fournitures et du traitement eaux	0,6	1,1%
Electricité et fuels – fabrication acide lactique	14,9	27,5%
Energie des fournitures et du traitement eaux	11,4	21,1%
Electricité et fuels – fabrication polyacide lactique	12,8	23,7%
Energie des fournitures et du traitement eaux	0,4	0,7%
Total énergie fossile	54,1	100,0%
Maïs (énergie renouvelable)	28,4	
Total énergie	82,5	

Tableau 2.3 Consommation d'énergie pour la production de polyacide lactique (Cargill Dow)

- En captant du CO₂ par la photosynthèse, le maïs constitue un puits de carbone et une source d'énergie renouvelable. Aussi, il est comptabilisé dans le bilan total d'énergie dans l'écoprofil du polyacide lactique.
- Les étapes en amont du procédé industriel (culture et transport au moulin) représentent près de 10% de la consommation totale d'énergie fossile.
- L'ensemble de l'étape de transformation du maïs en dextrose consomme une énergie de 8,8 MJ/kg PLA, à laquelle il faut ajouter la consommation énergétique de l'installation de traitement des eaux (0,6 MJ/kg PLA). Elle constitue donc une part de 17% de la consommation d'énergie fossile du système. Les vecteurs énergétiques utilisés sont l'électricité et le gaz naturel.
- La production d'acide lactique est l'étape la plus gourmande en énergie fossile, avec 26,3 MJ/kg PLA (gaz naturel et électricité), soit 49% de la consommation totale d'énergie fossile du système. Il faut noter que presque la moitié de ce chiffre (11,4 MJ/kg) est attribué au traitement des eaux du procédé.
- La polymérisation de l'acide lactique en polyacide lactique est responsable d'une consommation énergétique (gaz naturel et électricité) de 13,2 MJ/kg PLA, dont 0,4 MJ

attribuable au traitement des eaux. Avec 24% de la consommation d'énergie fossile totale, c'est la deuxième étape la plus intensive en énergie du système.

Les principaux vecteurs énergétiques utilisés sont l'électricité et le gaz naturel. On constate que le traitement des eaux et les autres équipements annexes aux trois dernières étapes de la production (fabrication du dextrose, fabrication de l'acide lactique, transformation en polyacide lactique) forment un poste important dans la consommation d'énergie (23%). Une part importante de l'énergie est destinée à la purification du produit et à l'évaporation de l'eau excédentaire. Selon P. Grüber, la concentration de la solution d'acide lactique doit être d'au moins 90 à 100 g/litre et le rendement de la fermentation supérieur à 85% pour que le procédé ait un avantage sur les produits pétrochimiques, en matière de consommation d'énergie fossile et d'émissions de CO₂.

Procédé « PLA B/WP »

Le nouveau procédé que Cargill Dow envisage de mettre en place d'ici 5 à 8 ans devra permettre de réduire considérablement sa consommation d'énergie fossile :

- des améliorations apportées à la technologie de production d'acide lactique devra permettre une réduction de 5,3 MJ d'énergie fossile ;
- l'utilisation de déchets agricoles (biomasse non utilisée pour l'amendement du sol) comme matière première et comme combustible (par combustion ou gazéification) pour produire de la vapeur devra engendrer une réduction supplémentaire de 19,6 MJ/kg PLA ;
- le recours à l'énergie éolienne devra encore permettre une réduction substantielle de 21,8 MJ/kg PLA.

Les 7,4 MJ d'énergie fossile restants sont liés aux activités en amont, à savoir l'exploitation agricole (engrais, pesticides, ...) et le transport.

Le modèle « PLA B/WP » ne tient pas compte d'améliorations potentielles de l'efficacité énergétique du procédé de polymérisation. Celles-ci n'auront plus d'influence sur le bilan « énergie fossile » du système, mais bien sur son efficacité énergétique globale.

ACV « cradle to grave » du système « PLA B/WP »

Dans une analyse de cycle de vie publiée en 2000, comparant les bilans énergétiques du PLA « B/WP » et du PS du berceau à la tombe, Cargill arrive au constat suivant : la consommation d'énergie fossile du système pour 1000 gobelets en polyacide lactique, s'élèverait à

- 786 MJ à la sortie de l'usine de transformation ;
- 762 MJ dans l'hypothèse d'une mise en décharge, la différence s'expliquant par la récupération de biogaz ;
- 704 MJ dans le cas d'une incinération dans une installation moderne, c'est à dire avec récupération de chaleur ;
- 742 MJ, en cas de digestion anaérobie.

L'option du recyclage n'a pas été prévue dans le cas des gobelets, les systèmes de recyclage des plastiques ménagers se limitant souvent aux bouteilles plastiques. On peut toutefois se faire une idée de la consommation d'un système prenant en compte le recyclage, à partir de l'étude réalisée par Cargill Dow du bilan énergétique des bouteilles en polyacide lactique en fin de vie. On constate que le recyclage est une voie beaucoup moins intéressante, du point de vue du bilan énergétique, que l'incinération, surtout lorsqu'il s'agit de fabriquer de nouvelles bouteilles (1400 MJ/ 1000 bouteilles voire 1640 MJ/ 1000 bouteilles contre 1300 MJ/1000 bouteilles).

C'est donc l'incinération avec récupération de chaleur qui est la voie la plus intéressante du point de vue du bilan énergétique du système.

d. Emissions de gaz à effet de serre

Les émissions de gaz à effet de serre du procédé actuel - principalement du CO₂, mais aussi du N₂O et du CH₄ – s'élèvent à 1,8 kg équivalent CO₂ par kg PLA. Ces émissions sont liées à la combustion des combustibles fossiles fournissant l'énergie aux différentes étapes du procédé, et à l'agriculture (décomposition, par les bactéries du sol, des engrais et des déchets agricoles). Le N₂O et le CH₄, bien qu'émis en moindre quantité que le CO₂, ont une influence importante sur le bilan des émissions de gaz à effet de serre, du fait de leur pouvoir de réchauffement nettement supérieur (respectivement 310 et 21 fois plus élevé que le CO₂). Le bilan tient compte du CO₂ capté par les cultures.

Procédé « PLA B/WP »

L'application du nouveau procédé « PLA B/WP » entraînerait une diminution des émissions de gaz à effet de serre. Celles-ci passeraient de 1,8 kg eq CO₂ / kg PLA à -0,3 kg lors du fonctionnement de la bioraffinerie, et à -1,7 kg dans le cas de son utilisation cumulée avec l'énergie éolienne. Dans ce scénario, les émissions de CH₄ et de N₂O liées à l'apport d'engrais ne sont pas comptabilisées, puisqu'elles sont déjà imputées à l'application pour laquelle la plante a été cultivée.

Dans ce scénario, les granulés de polyacide lactique fabriqués dans l'usine de Cargill Dow peuvent être considérés comme un puits de carbone. La réalité est différente et bien plus complexe, puisqu'une analyse de cycle de vie complète doit également prendre en compte les émissions liées à la transformation, aux transports et à la fin de vie du produit. Ensuite, selon son usage – vêtement, pièce d'automobile ou d'électronique, plastique d'emballage - et sa durée de vie, selon qu'il sera composté, incinéré ou mis en décharge, il libérera plus ou moins rapidement le carbone séquestré et fera donc varier le bilan de gaz à effet de serre.

ACV « cradle to grave » du système « PLA B/WP »

Dans le cas du système « PLA B/WP » considérant le produit en fin de vie, Cargill arrive au constat suivant : les émissions de CO₂ du système pour 1000 gobelets, s'élèvent à

- 8,1 kg à la sortie de l'usine de transformation ;
- 10,8 kg dans l'hypothèse d'une mise en décharge ;
- 16,3 kg dans le cas d'une incinération dans une installation moderne, c'est à dire avec récupération de chaleur ;
- 18,4 kg dans le cas du compostage ;
- 16,4 kg en cas de digestion anaérobie.

Du point de vue des émissions de CO₂, la mise en décharge affiche le bilan le plus positif, puisque le carbone reste séquestré longtemps dans le produit, suivie de l'incinération avec récupération de chaleur. L'option du recyclage en matériaux moins nobles, prévue pour les bouteilles, est légèrement plus favorable que l'incinération.

e. Autres émissions atmosphériques

EMISSIONS LIEES A L'AGRICULTURE

Les émissions liées à l'agriculture sont principalement les NO_x et les NH₃, des substances acidifiantes et eutrophisantes issues de la dégradation des engrais sous l'action de bactéries.

EMISSIONS DE COMBUSTION

La consommation d'énergie fossile du système entraîne l'émission de gaz de combustion, à savoir, outre le CO₂, du CO, du SO₂, des NO_x et des poussières. En choisissant le gaz naturel plutôt que le fuel pour ses unités de production de dextrose, d'acide lactique et de polyacide lactique, Cargill Dow limite les émissions de SO₂ et de poussières du système. En effet, le gaz naturel ne contient que des traces de soufre, tandis que le fuel oil peut contenir

jusqu'à 3,5% de soufre. Le gaz naturel engendre cependant davantage de NO_x que le fuel. La réduction du recours aux énergies fossiles prévue dans le nouveau procédé « PLA B/WP » (biomasse / éoliennes) entraînera une baisse importante de ces émissions. L'énergie éolienne ne produit pas d'émissions, ou très peu si l'on prend en compte l'émission indirecte liée à la construction et l'implantation de l'éolienne (10 g/kWh selon le rapport AMPERE⁹⁴). L'impact de la gazéification de la biomasse est plus discutable, car celle-ci engendre non seulement des émissions de NO_x, de poussières, de CO (et de SO₂ en traces), mais aussi des dioxines. Elle mériterait donc d'être étudiée de manière plus approfondie avant d'être préférée à d'autres formes d'énergie en vertu de son caractère renouvelable et de son bilan CO₂ plus favorable.

	Charbon	Gaz naturel	Biomasse
CO ₂	1026	402	17-27
SO ₂	1,2	0,2	0,07-0,16
NO _x	1,8	0,3	1,1-2,5

Tableau 2.4 Emissions résultant de la production d'électricité (g/kWh)⁹⁵

EMISSIONS DE PROCÉDES

D'après Agence américaine de protection de l'environnement (EPA), les émissions atmosphériques les plus importantes dans le procédé de raffinage du maïs sont les matières particulaires, les composés organiques volatils et le dioxyde de soufre. Les points d'émission ont été estimés à une centaine dans une installation type. Les émissions de COV et de SO₂ proviennent en très grande partie de l'opération de trempage et des différentes étapes d'évaporation et de séchage durant le procédé (séchage du gluten feed, des germes, des fibres, du gluten, de l'amidon et du dextrose) ainsi que de l'extraction de l'huile.

Le SO₂ dégage une odeur très prenante, qui nécessite une bonne ventilation et l'enfermement des équipements. Des COV comme l'acide acétique ou l'acétaldéhyde peuvent également dégager des odeurs nauséabondes. Celles-ci peuvent toutefois être limitées par l'usage de capteurs humides ionisants ou par oxydation thermique.

Les matières particulaires sont engendrées lors des différentes opérations sèches, c'est-à-dire lors de la manipulation, du nettoyage et du séchage du maïs ou de ses constituants. Ces émissions fugitives peuvent être limitées par des mesures de prévention (limiter les courants d'air, réduire la distance de chute libre des grains pendant les transferts) ou par des systèmes de ventilation et de hotte.

Procédé « PLA B/WP »

La réduction de la consommation d'énergie fossile est accompagnée d'une réduction proportionnelle des émissions de CO₂ ainsi que des autres émissions et déchets liés à la production d'énergie, à savoir notamment les émissions de SO₂, NO_x, COV.

f. Emissions dans l'eau

EAUX D'IRRIGATION

Les eaux provenant de l'irrigation des champs ou entraînées suite à des précipitations, sont chargées notamment en azote, en phosphore et en pesticides. Le maïs est une plante qui

⁹⁴ COMMISSION AMPERE (2000), *Rapport de la Commission pour l'Analyse des Modes de Production de l'Electricité et le Redéploiement des Energies (AMPERE) au Secrétaire d'Etat à l'Energie et au Développement durable – Rapport principal*, Sectie F. Hernieuwbare en alternatieve energieën, octobre 2000.

⁹⁵ Source : BESEL, cité dans SCHENKEL Yves, MARCHAL Didier, VANKERKOVE Régis, DELAUNOIS Cathy, « La biomasse-énergie en Région wallonne », dans *Les Sources d'énergie renouvelables*, Sixième Rencontre de l'Energie, Charleroi, le 21 septembre 2001.

nécessite un faible apport en azote (15 kg d'azote par tonne de grain, à comparer avec 30 kg/t pour le blé). Cependant, sa résistance exceptionnelle aux excès d'azote conduit généralement à la surfertilisation. C'est souvent le cas en Italie, notamment dans la plaine du Pô, où X. Poux⁹⁶ note l'application de doses annuelles deux fois plus élevées que les pratiques optimales. Plusieurs facteurs viennent aggraver les risques de pollution azotée par l'entraînement des nutriments vers les eaux :

- l'absence, en général, de couverture des sols en hiver pour ce type de culture ;
- la localisation fréquente des champs de maïs à proximité de cours d'eau ;
- l'irrigation intensive abondante.

Ces rejets azotés contribuent à l'eutrophisation des rivières.

Eaux de procédés

Les procédés en œuvre dans le moulin et l'installation de production d'acide lactique consomment de grandes quantités d'eau, qui entrent en contact direct avec les matières. Les performances des installations de traitement des eaux n'étant jamais de 100%, les eaux rejetées ont un haut degré de DCO et de DBO. A titre indicatif, les eaux de procédés des industries agro-alimentaires peuvent atteindre un niveau de DBO de 10 à 100 fois supérieur aux eaux usées domestiques. Dans certains sous-secteurs, les solides en suspension peuvent atteindre 120 g par litre. Les effluents de l'industrie de l'amidon après traitement contiennent typiquement les concentrations suivantes : 5-20 mg/l DBO, 50-300 mg/l DCO, 10-60 mg/l solides en suspension, 2-50 mg/l azote, 1-5 mg/l phosphore.⁹⁷ Cette augmentation de la concentration des eaux en nutriments entraîne des risques d'eutrophisation, avec pour effet la prolifération d'algues et une mortalité accrue des poissons suite à un manque d'oxygène.

Les eaux rejetées en grandes quantités par l'industrie agro-alimentaire peuvent également influencer le pH de l'eau d'accueil. Elles peuvent varier de très alcalines (pH 11) à très acides (pH 3,5). Dans l'industrie de l'amidon et la production d'acide lactique, on peut supposer que les eaux de procédés contiennent des acides (acide sulfurique, acide lactique). Les étapes de purification de l'acide lactique et de polymérisation sont toutefois décrites très sommairement étant donné la nouveauté de ce procédé, ce qui ne permet pas de connaître avec certitude la composition des effluents et des déchets provenant de ces étapes. Sur base des éléments d'information connus sur les procédés de production d'acide lactique et de polymérisation, on peut supposer que les effluents peuvent contenir également des sels (lactates).

D'après le tableau en page 28 ventilant les consommations énergétiques des différentes étapes du système, l'importante consommation énergétique du poste « énergie des fournitures et du traitement des eaux - acide lactique » peut laisser supposer une importance corrélative de la contribution de ce poste à la pollution aquatique.

Les eaux de procédés biologiques comme celles issues de l'installation de mouture et de transformation du maïs en dextrose contiennent peu d'éléments présentant des dangers toxicologiques, à l'exception peut-être de résidus de pesticides ou de traces de détergents utilisés pour le nettoyage des installations. L'usage de bonnes pratiques devraient toutefois pouvoir les réduire à un minimum.

g. Déchets solides

Résidus de récolte et du nettoyage des grains

Les premiers déchets générés par le système sont les résidus de récolte (feuilles, tiges, ...). Ceux-ci sont généralement utilisés comme fourrage pour le bétail, sont abandonnés sur la parcelle ou enfouis sous la surface des champs.

⁹⁶ POUX Xavier (2000), *L'impact environnemental de la culture du maïs dans l'Union Européenne : options pratiques pour l'amélioration des impacts environnementaux*, Paris.

⁹⁷ BREF Food, Drink and Milk Industry

Les déchets provenant du nettoyage et de l'inspection des grains de maïs peuvent également retourner à la terre. Les pertes de matières organiques survenant dans le procédé de mouture peuvent être récupérées dans le procédé ou rentrer dans la fabrication d'aliments pour bétail.

SOUFRE

Le soufre provenant de l'étape de trempage, présent dans les effluents sous forme d'acide sulfurique ou de sulfites, peut être récupéré en partie par un traitement anaérobie des eaux de procédé impliquant des micro-organismes.⁹⁸

BOUES D'EPURATION

Les boues provenant du traitement des effluents de l'industrie agro-alimentaire présentent l'avantage, par rapport aux autres boues industrielles, de contenir très peu de déchets toxiques (métaux lourds, PCB, hydrocarbures aromatiques polycycliques). Grâce à cette caractéristique, elles peuvent être revalorisées dans l'agriculture, recyclant ainsi les matières fertilisantes au sol. Dans plusieurs pays d'Europe du Nord, c'est d'ailleurs la filière privilégiée. Certains pays sont toutefois plus sévères que d'autres en matière de normes sur la composition des boues d'épuration : le Danemark et les Pays-Bas ont fixé des valeurs limites pour les éléments-traces métalliques qui sont nettement en-deçà des valeurs-guides européennes, tandis que l'Allemagne a fait de même pour les éléments-traces organiques.⁹⁹

La valorisation des boues en agriculture est soumise à un certain nombre de contraintes, dont des contraintes de qualité sanitaire (pathogènes et odeurs), la nature des sols, les distances et les capacités d'épandage, le type de culture pratiquée et la concurrence des autres sous-produits de l'activité agricole (résidus chaulés des sucreries, lisiers et fumiers)¹⁰⁰.

Les boues d'épuration peuvent aussi être utilisées en mélanges, sous certaines conditions, en plantations d'arbres et d'arbustes et pour l'enherbement (de pistes de ski, d'aménagements routiers).¹⁰¹

PRODUITS EN POLYACIDE LACTIQUE EN FIN DE VIE

Les déchets constitués par les articles en polyacide lactique en fin de vie seront fonction de la filière de gestion (pour autant qu'ils soient collectés) :

- abandonnés dans la nature, les polymères biodégradables se décomposent lentement en CO₂ et en CH₄ ;
- incinérés, ils seront transformés principalement en CO₂, en eau, et en cendres, tout en fournissant de l'énergie (d'après le CRIF, le contenu calorifique des principaux polymères biodégradables serait limité à 50 à 60% de celui des polyoléfines)
- en décharge, ils resteront plus ou moins inertes : en effet, on constate que, « dans les centres d'enfouissement techniques, les déchets théoriquement biodégradables représentent 70% »¹⁰²
- le recyclage n'est pas exploité pour les articles d'emballage souillés ;

⁹⁸ RASKIN Lutgarde, RAUSCH Kent D., TUMBLESON Mike E., DAUGHERTY Becky J., ANGENENT Lars T., AGBISIT Roderick M., BELYEA Ronald L. (2002), « Nutrient recovery from food processing industry waste streams », in TUMBLESON Mike E., O'DONNELL Melanie, *Proceedings from 2002 Planning Committee Conference*, University of Illinois and Corn Refiners Association Inc.

⁹⁹ OTV (1997), *Traiter et valoriser les boues*.

¹⁰⁰ Ibid.

¹⁰¹ DINGER Françoise, AUBRY Frédéric, WIART Jacques (1999), *Utilisation des déchets organiques en végétalisation*, ADEME : Cemagref, Paris.

¹⁰² Ibid.

- le compostage industriel, qui est la filière à privilégier pour les plastiques compostables, surtout pour les films et emballages, transforme le polyacide lactique en CO₂, en eau et en humus.

La filière du compostage soulève des questions quant aux risques toxicologiques qui pourraient y être liés. Le compost étant destiné à être utilisé comme fertilisant pour les cultures, il est important que celui-ci ne soit pas contaminé par des métaux lourds ou d'autres substances toxiques.

Suite à l'usage abusif du terme « biodégradable », diverses organisations de standardisation (ISO au niveau international, ASTM aux USA, DIN en Allemagne, CEN en Europe, JBPS au Japon) ont développé des tests pour définir la biodégradabilité de matériaux. Ces tests évaluent une série de paramètres : le changement d'aspect, la perte de poids, l'évolution des propriétés mécaniques ou du poids moléculaire, la consommation d'oxygène, l'émission de CO₂, le bilan du carbone, ... et cela dans des conditions expérimentales différentes : test en boîte de Pétri, tests enzymatiques (=tests d'orientation), test VTT, test de Sturm (=tests de biodégradabilité), consortium bactérien, boues activées, compostage, tests d'exposition (en fonction notamment des applications visées et de la pression légale) et tests toxicologiques, devant assurer que les matériaux biodégradables ne sont pas toxiques pour la santé de l'homme et pour l'environnement.¹⁰³

Sur base des résultats de ces tests, le produit sera ou non certifié biodégradable et/ou compostable par un organisme indépendant (AIB Vinçotte en Belgique, IBAW en Allemagne, IBI Composting Council aux USA, ...). Cette certification assure que « le produit est conforme aux exigences d'un cahier des charges donné (une norme par exemple) »¹⁰⁴ et officialise les déclarations du fabricant. Elle se traduit par l'apposition d'un logo (« OK compost » dans le cas belge) sur le produit certifié biodégradable et/ou compostable de manière à permettre au consommateur de le reconnaître.

Il est important de préciser que les produits certifiés compostables ne le sont bien souvent que « dans les conditions étudiées par les tests, c'est-à-dire dans une installation de compostage industrielle spécifique, qui maintient une température suffisante (de l'ordre de 60 °C) pendant les 12 semaines du processus. A l'issue de celui-ci, les produits certifiés « OK compost » sont réduits à des fragments < 2 mm ». ¹⁰⁵ Mis en décharge ou abandonnés à la surface du sol, ces produits ne se comporteront pas de la même manière.

Les définitions et les normes varient légèrement d'une instance de standardisation à l'autre et donc d'un pays à l'autre. Les fabricants de plastiques biodégradables à base de matière renouvelable, par la voix notamment de l'IBAW (Interessengemeinschaft Biologisch Abbaubare Werkstoffe e.V.) et d'ERRMA (European Renewable Resources & Materials Association), dénoncent l'absence de procédure de standardisation et de certification uniformisée au niveau européen et de cadre légal clair pour le recyclage organique des déchets plastiques. Une proposition d'amendement, par la Commission et le Parlement européen, de la directive 94/62/EC sur les emballages et les déchets d'emballage, menacerait actuellement le secteur des plastiques biodégradables, en excluant le recyclage organique de l'option de recyclage privilégiée par la directive dans le but de limiter à un minimum la mise en décharge¹⁰⁶.

En ce qui concerne l'harmonisation des procédures de standardisation au niveau européen, un lien est prévu entre la directive 94/62/CE et la norme EN 13432 approuvée par la Commission européenne en juin 2001, en vue de préciser la définition des emballages compostables et biodégradables, restée très floue dans la directive actuelle. La norme EN 13432 doit permettre de distinguer les emballages réellement biodégradables et

¹⁰³ CLARINVAL A.-M., MONFORT-WINDELS F. (2003), *Les polymères biodégradables*, CRIF, Seraing.

¹⁰⁴ Ibid.

¹⁰⁵ Ibid.

¹⁰⁶ Prise de position d'ERRMA, transmission informelle le 18 août 2003.

compostables sur base de : la composition du matériau (concentrations limites en certaines substances, comme certains composés organiques ou des métaux lourds), sa biodégradabilité (tests normalisés ISO, minéralisation de l'emballage à 90% après 6 mois), sa désintégration (après 12 semaines, seuls 10% du poids original peuvent se retrouver en fragments > 2 mm) et la qualité du compost (tests de toxicité).¹⁰⁷

Les emballages biodégradables pourraient être traités en mélange avec des déchets de jardin et de cuisine au sein de la filière de compostage. D'après les résultats du projet pilote lancé par la ville de Kassel, en Allemagne, le système mis en œuvre pour la mise sur le marché, la collecte et le compostage d'emballages plastiques biodégradables, semble bien fonctionner, moyennant une importante campagne de sensibilisation de la population. Les systèmes de compostage industriel et de collecte des déchets organiques devront toutefois se développer sérieusement pour que les plastiques biodégradables représentent réellement un avantage en matière de gestion des déchets.

Un autre risque lié aux plastiques biodégradables est moins bien contrôlable : il s'agit du comportement laxiste que sa popularité pourrait engendrer chez des consommateurs mal informés. Cela pourrait se traduire par un usage accru d'emballages ou par un abandon plus fréquent des déchets sur le sol. Une campagne d'information correcte et d'éducation de la population s'impose donc.

h. Contamination des sols

La contamination des sols par un procédé biologique est fortement limitée. Les éléments pouvant présenter un danger sont les produits chimiques non biodégradables utilisés dans l'agriculture (les pesticides) et dans l'industrie (détergents, catalyseurs). Dans l'industrie, les risques sont toutefois limités par les précautions d'emploi. La contamination des sols par les pesticides est, quant à elle, plus difficile à éviter, et variera fortement de l'application ou non de bonnes pratiques par l'agriculteur.

Dans le cadre plus large de la gestion du sol, quatre grands impacts sont imputés à la culture intensive : l'érosion, le compactage, l'acidification et la pollution directe des sols. En comparant la culture du maïs avec la culture du blé ou les prairies cultivées ou non, X. Poux¹⁰⁸ constate que le maïs cumule les risques en matière de bonne gestion des sols : labours profonds, sols laissés nus, réaménagement parcellaire fréquent, autant de facteurs qui renforcent les risques d'érosion. L'érosion est associée au mode de culture intensif caractéristique de la culture du maïs. Le développement de tels systèmes a été largement encouragé par la politique agricole commune. Celle-ci a poussé à une simplification des systèmes agraires, à un accroissement des surfaces des cultures et à un usage accru de machines agricoles lourdes et de pesticides. Le phénomène d'érosion cause ainsi des pertes de terres de 3,6 t/ha en Belgique et jusqu'à 6,1 t/ha dans certains comtés anglais¹⁰⁹. D'après ce même rapport, les coûts externalisés de l'érosion (endommagement de biens, de routes et de communications, pollution des rivières et de l'eau potable, sédimentation de réservoirs et dégâts aux piscicultures) sont beaucoup plus élevés que les coûts endossés par les agriculteurs. Par ailleurs, les pertes en matières organiques peuvent contribuer à exacerber les phénomènes de sécheresse dans certaines régions, du fait d'un plus faible pouvoir de rétention d'eau. Des réaménagements fonciers visant à simplifier la culture, comme

¹⁰⁷ CLARINVAL A.-M., MONFORT-WINDELS F. (2003), *Les polymères biodégradables*, GRIF, Seraing.

¹⁰⁸ POUX Xavier (2000), *L'impact environnemental de la culture du maïs dans l'Union Européenne : options pratiques pour l'amélioration des impacts environnementaux*, Paris

¹⁰⁹ EVANS R. (1996) *Soil Erosion and its Impact in England and Wales*, Friends of the Earth, London, cité dans: BOATMAN Nigel, STOATE Christopher, GOOCH Robert, CARVALHO Carlos Rio, BORRALHO Rui, DE SNOO Geert, EDEN Peter (1999), *The Environmental Impact of Arable Crop Production in the European Union: Practical options for Improvement*, Allerton Research and Educational Trust, UK.

l'arrachage des haies et les remembrements, ainsi que la monoculture, qui laisse le sol nu pendant une partie importante de l'année, renforcent encore les taux d'érosion. Le compactage des sols, lié à la forte mécanisation, a un impact négatif sur l'abondance de la microfaune du sol. La culture du maïs est aussi caractérisée par une fertilisation azotée très fréquemment excédentaire et un recours fréquent au drainage de zones humides, qui augmentent les risques d'acidification des sols. L'usage important de pesticides, l'apport d'engrais contenant des résidus de métaux lourds (cuivre, cadmium, zinc) comme les déjections de volailles et les boues d'épuration, et l'application de fortes doses de phosphore contribuent à polluer les sols davantage que d'autres cultures.

Cargill Dow développe actuellement un programme intitulé « Sustainable Agricultural Production Program » traitant de ces problématiques¹¹⁰.

i. Toxicologie

PESTICIDES

Les principaux risques toxicologiques sont liés à l'emploi de pesticides dans l'agriculture, principalement des herbicides et des insecticides. De nombreux pesticides contiennent des composés organochlorés, des métaux ou des métalloïdes, qui sont bioaccumulables dans les chaînes trophiques, augmentant ainsi les risques de morbidité. Leur toxicité aiguë est généralement bien connue. En l'absence de connaissances suffisantes sur la toxicité chronique de ces substances et de leurs métabolites, le principe de précaution est de mise. Certains d'entre eux occasionnent des dérèglements hormonaux.

Les effets à long terme des pesticides et de leurs métabolites sur la santé humaine ne sont pas encore bien cernés. Ils font partie des substances prioritaires étudiées par le programme REACH. De par leur fonction (supprimer les adventices et les insectes ravageurs), il est évident que ces substances présentent une toxicité aiguë en très petites quantités. Les réglementations européennes et nationales imposent des valeurs limites (CMA) pour la concentration de ces substances dans l'eau potable. La toxicité chronique (cancérogénèse, déficience du système immunitaire, mutagenèse, tératogénèse, neurotoxicité, dérèglements hormonaux) est plus difficile à démontrer, car cela nécessite des études toxicologiques et épidémiologies plus lourdes et beaucoup plus longues. A défaut de connaissances suffisantes, le principe de précaution est généralement admis. Les effets néfastes de ces substances peuvent se manifester tant chez l'homme que chez la faune terrestre et aquatique, les insectes, la microfaune du sol et la flore. Plus de 40 pesticides ont été identifiés dans les eaux souterraines ou de surface de l'Union européenne, en concentration supérieure à 0,1 µg, dépassant les CMA imposées par la Directive concernant l'eau potable (1992). Une étude de 1999 sur les coûts de l'agriculture au Royaume-Uni, citée par l'Allerton Research and Educational Trust¹¹¹, évaluait à £19,39 à £22,10 par hectare de terrain cultivé les coûts de traitement de l'eau qu'engendre l'utilisation de pesticides pour les consommateurs d'eau.

Se basant sur une comparaison entre différents pesticides utilisés dans la culture du maïs ou dans d'autres cultures, X. Poux constate que les coefficients d'entraînement des matières actives, leurs risques de volatilisation, leur durée de vie (DT50) et leur rémanence (DJA et aquatox) sont généralement plus élevés dans le cas des pesticides utilisés dans la culture du maïs que dans la culture du blé ou dans le cas des herbages.

X. Poux souligne la difficulté d'avoir des données précises et interprétables dans ce domaine, car si des études existent sur la consommation globale en produits phytosanitaires, il est très

¹¹⁰ Communication personnelle de E. Vink, 23 avril 2003

¹¹¹ BOATMAN Nigel, STOATE Christopher, GOOCH Robert, CARVALHO Carlos Rio, BORRALHO Rui, DE SNOO Geert, EDEN Peter (1999), *The Environmental Impact of Arable Crop Production in the European Union: Practical options for Improvement*, Allerton Research and Educational Trust, UK.

difficile de trouver des données spécifiques à la culture du maïs. On sait cependant que la culture du maïs est particulièrement gourmande en pesticides, comparée aux autres grandes cultures. Les chiffres varient entre 2,2 kg/ha de matières actives utilisées à 3,5-4 kg/ha d'herbicides et 15 kg/ha d'insecticides. Le maïs est particulièrement sensible aux insectes ravageurs du sol (taupin) et à la pyrale du maïs, dont la larve détruit la tige, pouvant entraîner des pertes de rendement allant de 30 à 40% (X. Poux). Les traitements du sol ont longtemps été à base de lindane, aujourd'hui interdit dans plusieurs pays européens, ou de carbofuran (famille des carbamates), ou encore de deltaméthrine (famille des organophosphorés). Les traitements foliaires recourent quant à eux aux pyréthrinoïdes ou aux organophosphorés.

De plus, la lutte insecticide est largement préventive. En France, X. Poux note qu'un traitement préventif est entrepris dans 2/3 des surfaces en maïs. Les produits phytosanitaires peuvent être véhiculés par l'air ou par l'eau. Selon le mode de dispersion des pesticides, les pertes peuvent être plus ou moins importantes. Par exemple :

- les traitements par avion, pratiqués sur des grandes étendues, comme c'est le cas aux USA, peuvent engendrer des pertes de l'ordre de 50%, à comparer à des pertes de 1 à 30%, selon les sources, dans le cas de l'utilisation de rampes ;
- la manutention (stockage, devenir des emballages, rinçage des cuves de traitement) est également une source de pollution. C'est d'autant plus le cas que les pesticides modernes sont fournis en fortes concentrations de matières actives, induisant un risque encore plus élevé de pollution lors de fuites ou du rinçage d'équipements¹¹².
- les pertes de ruissellement au sol sont de l'ordre de 2 à 5% ;
- les pertes par volatilisation peuvent atteindre 80% quelques jours après traitement.

La monoculture et la proximité d'un cours d'eau qu'impose l'irrigation des cultures de maïs contribuent à la concentration de ces substances dans le milieu.

ACIDE LACTIQUE, LACTATES ET POLYACIDE LACTIQUE

L'exposition à de fortes concentrations d'acide lactique peut déclencher les symptômes suivants : gorge irritée, sensation de brûlure, toux, perte d'haleine lors de son inhalation, rougeurs et douleurs lors du contact avec la peau, de même qu'en cas de contact avec les yeux (avec, en plus, des brûlures sérieuses) et une gorge irritée, une sensation de brûlure, des douleurs et des crampes abdominales, des nausées et des vomissements en cas d'ingestion. Cependant, présent en faible quantité, l'acide lactique ne semble pas être dangereux. Le lactate L(+) est un intermédiaire naturel du métabolisme des mammifères, issu de la dégradation du glycogène lors d'efforts physiques, d'acides aminés et d'acides dicarboxyliques. L'OMS signale, par ailleurs, que l'homme consomme des produits fermentés contenant de l'acide lactique DL depuis des siècles, apparemment sans en être affecté. Aussi, l'OMS a estimé qu'il n'était pas nécessaire d'établir de concentration journalière admissible pour l'homme. Une réserve est toutefois émise pour les enfants.¹¹³

Le polyacide lactique en soi ne contient pas d'éléments toxiques susceptibles de causer des problèmes de santé. Il est d'ailleurs utilisé dans le domaine médical (implants, fils de suture, agrafes résorbables), pour sa dégradabilité et l'innocuité de ses métabolites dans le corps. Dans le domaine des emballages alimentaires, des normes très sévères existent pour éviter la migration de contaminants des emballages alimentaires vers l'aliment. L'acide lactique fait partie des substances inscrites sur la liste positive des substances autorisées par la Commission européenne.

SO₂

Les effets toxicologiques du SO₂ sur l'homme et sur l'environnement sont connus. Une exposition de courte durée à cette substance peut provoquer des irritations de la gorge

¹¹² *Ibid.*

¹¹³ INCHEM, WHO food additive series N°5.

lorsqu'elle inhalée, des gelures lors d'un contact avec la peau, et des rougeurs, des douleurs, voire des brûlures sérieuses lors d'un contact avec les yeux. Lors d'une exposition prolongée ou répétée, des symptômes d'asthme peuvent apparaître. Les normes TLV, STEL et MAK sont respectivement de 2 ppm, 5 ppm (1992-1993) et 2 ppm (1993)¹¹⁴.

D'un point de vue écotoxicologique, le SO₂ peut être responsable d'une baisse de la productivité chez les végétaux, voire d'un dépérissement des forêts suite aux pluies acides.

ETAIN

L'octoate d'étain, utilisé comme catalyseur dans la polymérisation, est une source potentielle de contamination. Son utilisation dans le procédé est toutefois peu documentée.

Généralement, les catalyseurs utilisés pour la polymérisation sont intégrés dans le polymère. La concentration de l'étain dans le produit en fin de vie est un élément auquel il faut être attentif dans le cadre du compostage du plastique, étant donné que le but est d'utiliser les produits de la dégradation dans l'agriculture.

BOUES VALORISABLES ET COMPOSTS

La valorisation des déchets industriels dans l'agriculture peut présenter un danger toxicologique si elle est mal contrôlée. Les boues d'épuration du bioprocédé, en théorie, ne devraient contenir que de très faibles quantités de contaminants. Les concentrations des boues d'épuration du procédé en substances toxiques (étain, traces de pesticides et de détergents, ...) ne sont toutefois pas connues.

La composition d'un compost contenant les produits de dégradation des plastiques en polyacide lactique, dépendra surtout du type d'additifs ajouté par le transformateur (plastifiants, colorants, encres, anti-oxydants, ...). Cependant, les normes en matière de biodégradabilité et de compostabilité des emballages plastiques portent sur le produit fini. Des emballages contenant des concentrations en métaux lourds ou en d'autres substances toxiques au-delà d'un certain seuil ne pourront donc pas être compostés. Il reste à savoir d'une part, si ces normes sont suffisamment sévères pour protéger le consommateur des produits issus d'une agriculture utilisant un tel compost, et d'autre part si, en pratique, les systèmes de tri et de compostage permettent effectivement d'éviter que des substances toxiques soient introduites par accident.

Dans son contrat avec ses clients, Cargill Dow a prévu une liste de substances interdites (polluants organiques persistants tels l'aldrine, le chlordane, le DDT, les PCB, ... ; composés persistants, bioaccumulables et toxiques tels le plomb, le mercure ; matériaux cancérigènes ; métaux lourds ; perturbateurs endocriniens). Par exemple, selon un article publié dans *Packaging World*¹¹⁵, les films d'emballages en polyacide lactique utilisés par Sony seraient imprimés avec de l'encre à base d'huile végétale.

j. Sécurité

L'industrie agro-alimentaire est une industrie qui présente généralement peu de risques d'accidents professionnels si on la compare à des activités comme l'exploitation minière, l'exploitation pétrolière et les activités liées à la manipulation, la fabrication, l'emploi ou le stockage de substances dangereuses comme les raffineries, les sites pétrochimiques, les usines chimiques, les dépôts pétroliers ou les dépôts d'explosifs, qui sont soumises à la législation Seveso relative à la prévention et à la gestion des accidents majeurs.

Si on élargit le champ de l'analyse de cycle de vie à l'utilisation de pesticides et d'engrais, on se doit toutefois d'évoquer les risques liés à la fabrication et l'entreposage de ceux-ci, illustrés notamment par l'accident de Sandoz, à Bâle, en 1986.

¹¹⁴ INCHEM

¹¹⁵ ORLOSKI Arnie, "Sony in Japan introduces 'green' packs", in *Packaging World*, August 2001.

Avec le développement des techniques de modification génétique, une nouvelle forme de risque apparaît. La problématique des organismes génétiquement modifiés (maïs transgénique, micro-organismes génétiquement modifiés) étant récente, les impacts que pourraient exercer de tels organismes sur l'environnement relèvent encore largement du domaine de l'inconnu. X. Poux relève toutefois deux caractéristiques de la transgénèse qui sont moteurs d'après discussions sur les effets des OGM sur l'environnement et la santé :

- la modification brutale du patrimoine génétique, dont il est difficile de prévoir toutes les conséquences ;
- l'usage de gènes susceptibles de passer d'une espèce à l'autre.

Les risques sont renforcés par le fait que les cultures génétiquement modifiées n'étant pas confinées, elles peuvent interagir avec leur environnement.

Les principaux avantages recherchés dans l'application de la transgénèse à la culture du maïs sont : la résistance aux insectes (pyrale et sésamie) et la tolérance aux herbicides, notamment le glufosinate utilisé dans le Roundup. Les maïs génétiquement modifiés (Bt et Cb) ont cependant entraîné des effets secondaires prévisibles ou non, comme l'apparition de variétés de pyrales résistantes et une mortalité élevée des larves de papillon Monarque après ingestion du pollen de maïs Bt. X. Poux évoque aussi le risque de développements de résistance à un antibiotique (l'ampicilline), bien que le transfert de gènes de plante à bactérie ne soit pas prouvé. Quant à l'introduction d'un gène de tolérance au glufosinate, elle n'a aucune justification environnementale. Au contraire, elle risque de mener à un usage accru d'herbicide et, plus indirectement, elle pourrait entraîner l'apparition d'adventices plus résistantes, comme dans le cas de la pyrale.

L'utilisation des micro-organismes dans le procédé de fermentation ne présente pas de danger a priori. La conversion du sucre en acide lactique est effectuée par la bactérie *Lactobacillus*, une bactérie non pathogène.

k. Utilisation d'espace

Les données utilisées par Cargill Dow pour la culture du maïs sont celles provenant de la culture dans les plaines du Nebraska et de l'Iowa, sources vraisemblables d'approvisionnement du moulin de Cargill Dow.

La quantité de maïs nécessaire à la production annuelle de 140.000 tonnes de polyacide lactique (capacité de production de Cargill Dow) est estimée à 14,6 millions de boisseaux (530.987 m³) de maïs moulu. A raison de 120 boisseaux par acre, cela représente un champs de maïs de 117.000 acres, soit 47.350 hectares¹¹⁶. C'est l'équivalent de dix fois la superficie de la Forêt de Soignes !

Le site de production de Cargill Dow couvre quant à lui une superficie de 16 acres (6,5 hectares). Le moulin, l'installation de production d'acide lactique et de polyacide lactique se trouvent sur le même site, ce qui réduit les déplacements au seul transport du maïs du champ à l'usine.

l. Paysages

L'élément « paysage » est le paramètre le moins objectif du tableau. La vue d'un immense champs de maïs peut être perçue différemment selon la personne. Toutefois, la monoculture est généralement perçue comme destructrice des paysages, car elle efface tout élément de variation (haie, buisson, ...). De plus, les terres restent nues sur des hectares pendant plusieurs mois.

¹¹⁶ GRUBER Patrick R. (2000), "Commodity Polymers from Renewable Resources: Polylactic Acid", in *Carbon Management: Implications for R&D in the Chemical Sciences and Technology: A Workshop Report to the Chemical Sciences Roundtable*, The National Academy of Sciences, pp 166-184.

Aux USA, l'importance de ce problème est moindre qu'en Europe, car les USA disposent de larges étendues inhabitées.

(voir aussi photos en annexe 3)

m. Biodiversité

La culture du maïs, comme toute monoculture intensive, de par les pratiques utilisées, a un effet négatif sur la biodiversité. La recherche de la meilleure rentabilité implique l'utilisation maximale des terres et donc la disparition d'habitats comme les haies, les bords de champs, les talus, les buissons.

Des pressions supplémentaires sont exercées par le travail du sol intensif, la lutte phytosanitaire particulièrement âpre dans le cas du maïs, les sols laissés nus en hiver, l'épandage d'engrais et notamment de boues d'épuration et de déjections contenant des métaux lourds. La combinaison de ces pratiques favorise le transfert de différents polluants (pesticides, métaux lourds, azote, phosphore) dans le milieu, augmentant ainsi les risques écotoxicologiques et la disparition d'espèces sensibles. Par ailleurs, le drainage des terres humides et l'irrigation ont une action néfaste sur le fonctionnement des zones humides.

L'évaluation de l'impact de la culture du maïs sur la biodiversité dépend toutefois de l'activité ou de la couverture du sol à laquelle elle se substitue. La culture du maïs a tendance à se substituer à des systèmes herbagers, où la biodiversité est plus importante. Dans ce cas, l'impact sur la biodiversité est négatif.

Le remplacement du maïs par des déchets agricoles ou des déchets de l'industrie agro-alimentaire comme source d'approvisionnement du procédé de polyacide lactique transformerait la situation en une opération nulle, vu que les impacts seraient déjà imputés à la culture en place.

3. LA PRODUCTION DE POLYSTYRÈNE

3.1 Propriétés du polystyrène

On distingue trois principaux types de polystyrène :

- le polystyrène standard (ou cristal), qui est d'une très grande clarté, mais qui est cassant ;
- le polystyrène choc, opaque et plus résistant en raison de l'ajout de butadiène ;
- le polystyrène expansé, obtenu par l'incorporation d'un agent gonflant (généralement du pentane), qui transforme le polystyrène en mousse en s'évaporant.

Des copolymères du polystyrène - polystyrène choc, polystyrène acrylonitrile, acrylobutadiène styrene - sont utilisés pour les articles requérant une meilleure résistance aux chocs.

Les propriétés et les applications du polystyrène standard sont ont été décrits plus haut (page 17).

Souvent, la littérature ne fait pas de distinction entre les différentes formes du polystyrène. Si l'on prend en compte le polystyrène standard (PS), le polystyrène choc (PSC) et le polystyrène expansé (PSE), la gamme d'applications est beaucoup plus étendue ¹¹⁷:

¹¹⁷ REYNE Maurice (1998), *Les plastiques*, Presses Universitaires de France, Paris.
THE ASSOCIATION OF PLASTICS MANUFACTURERS IN EUROPE (APME), <http://www.apme.org>.

- emballage : produits laitiers, viandes et poissons, boissons et plats à emporter, gobelets et vaisselle jetables, ...
- électronique : boîtiers de disques compacts et DVD, cassettes vidéos ou audios, coffrets d'ordinateurs, de postes radio ou TV, ...
- électroménager : réfrigérateurs, aspirateurs, ...
- construction : mousse isolante PSE, panneaux, ...
- médical : boîtes de Pétri, tubes à essai, ...
- autres : accessoires de cuisine, de salle de bain, de jardin, jouets, ...

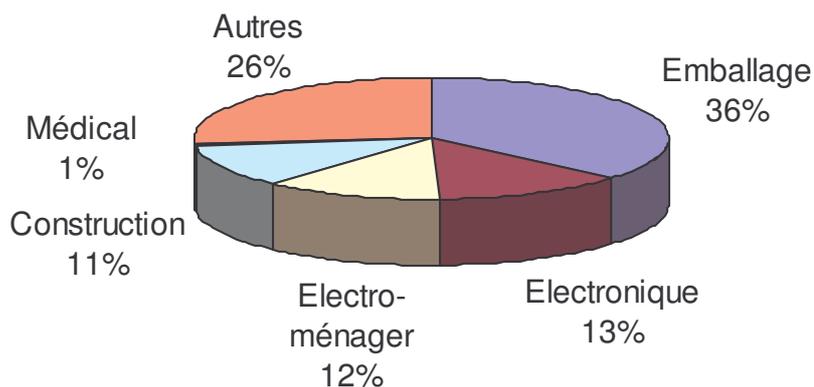


Figure 3.1 Applications du polystyrène (PS, PSC & PSE)

3.2 Marché du polystyrène

Le polystyrène est le quatrième polymère produit au monde après le polyéthylène, le PVC et le polypropylène. La demande mondiale se chiffrait à 10,6 millions de tonnes en 2001. La demande de polystyrène en Europe se chiffrait à près de 2,7 millions de tonnes en 2001, soit 26% de la demande mondiale.¹¹⁸

La production de polystyrène en Europe connaît une croissance annuelle de 4 à 5%.

¹¹⁸ THE ASSOCIATION OF PLASTICS MANUFACTURERS IN EUROPE (APME) (2001), *Insight into consumption and recovery in Western Europe*, Brussels.

3.3 Description du système de production

vert : flux solides
rouge : flux atmosphériques
bleu : flux liquides
(HC= hydrocarbures)

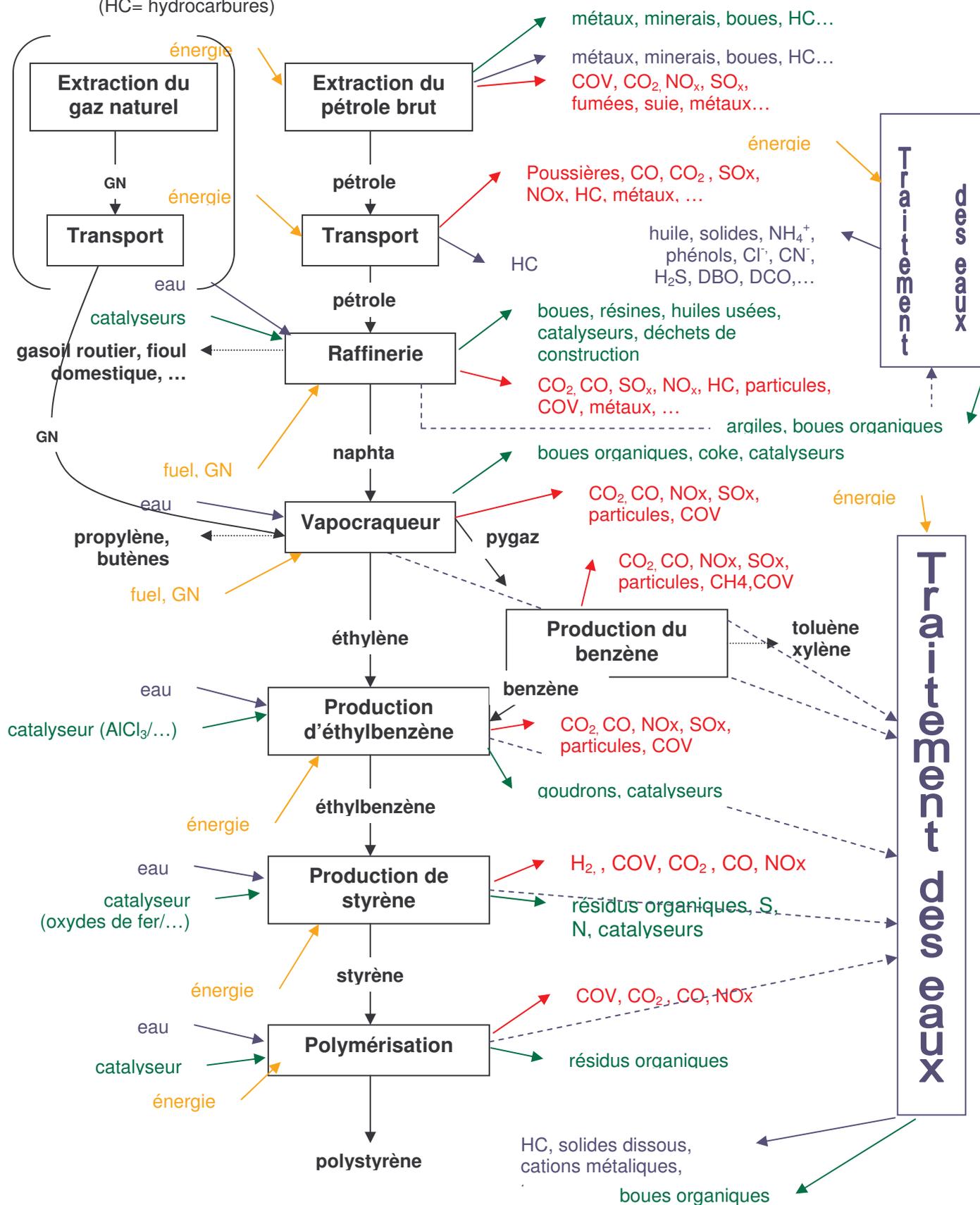


Figure 3.2 Diagramme des flux du système de production de polystyrène

Pour une raison de simplicité, le schéma ne laisse apparaître qu'une étape de transport : le transport du pétrole entre le site d'extraction et la raffinerie. Les différentes étapes de transport consécutives à l'étape de raffinage varient selon la concentration géographique du système en un site ou la répartition des étapes (raffinerie - craqueur - installation de production d'éthylbenzène, de styrène, de polystyrène) entre différents sites.

Exploration et extraction du pétrole:

Le polystyrène, comme la plupart des plastiques, est dérivé du pétrole et – dans certains procédés - du gaz naturel. Ces deux matières sont le fruit d'un processus naturel de fossilisation de matières organiques, qui a mis des millions d'années. Le pétrole, de même que le gaz naturel, est extrait de la terre par des puits forés sous terre ou sous les océans.

Transport: Le pétrole brut est transporté principalement par bateau vers les raffineries, qui se trouvent généralement à proximité des côtes. En fonction de la situation géographique du site d'exploitation, une partie du trajet peut également se faire par train, par camion-citerne ou par pipeline.

Raffinerie : La raffinerie est un ensemble très complexe de procédés. Le pétrole et le gaz naturel y sont transformés en une multitude de produits :

- carburants (pour automobiles, camions, avions, bateaux)
- combustibles pour la génération de chaleur et d'électricité pour l'industrie et les ménages
- matières premières pour les industries pétrochimique et chimique (plastiques, fibres synthétiques, produits pharmaceutiques)
- produits spécialisés : huiles lubrifiantes, cires, paraffines et bitumes.

par une variété de procédés de conversion - distillation, craquage (catalytique, hydrocraquage, vapocraquage, ...), alkylation, polymérisation, reformage catalytique, isomérisation, ... - et de traitement - désalinisation, désulfuration, séchage et adoucissement, ... comme l'illustre le schéma ci-dessous.

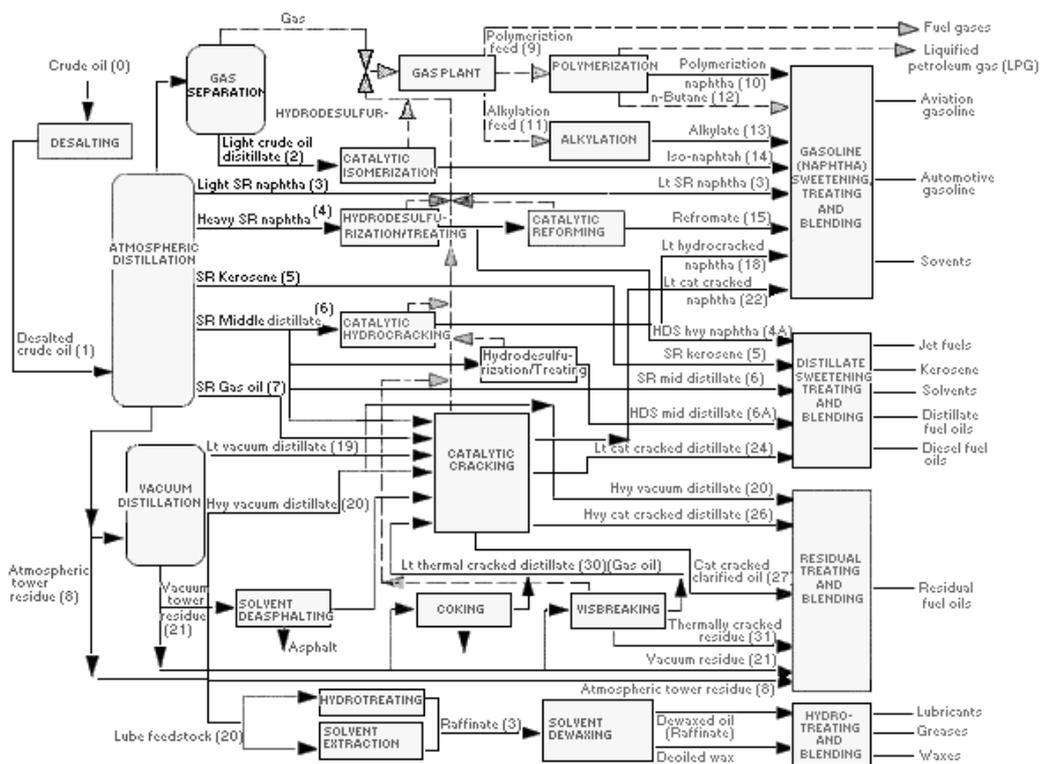


Figure 3.3 Schéma des procédés de raffinage du pétrole (OSHA Technical Manual)

Cette structure complexe laisse déjà entrevoir la difficulté de quantifier avec précision les flux entrants et les flux sortants attribuables à la production d'un des produits issus de ce système. Les opérations liées directement à la production de naphta, la matière première pour la production de polystyrène, sont :

- la désalinisation : Le pétrole brut qui arrive dans la raffinerie est composé d'environ 84% de carbone, 14% d'hydrogène, 1 à 3% de soufre, moins d'1% d'azote, d'oxygène, de métaux (nickel, fer, vanadium, cuivre, arsenic) et de sels (chlorure de sodium, de magnésium, de calcium). Eau, sels inorganiques, particules en suspension, métaux-trace hydrosolubles entraînent la corrosion de l'installation et la désactivation des catalyseurs. Avant d'être distillé, le pétrole doit donc être débarrassé de ces impuretés. Ce processus de désalinisation se fait par séparation chimique ou électrostatique, engendrant des effluents d'eau chaude chargés en sels, sulfures d'hydrogène, ammoniacque, phénol, solides en suspension ou dissous et en boues constituées d'un mélange d'oxydes de fer, d'argile, de sable, d'eau, d'huile et de cire émulsionnée et de métaux lourds. Les effluents, qui ont une demande biochimique en oxygène particulièrement élevée, seront traités par l'installation de traitement des eaux tandis que les boues devront être traitées comme déchets dangereux.
- la distillation fractionnée (ou distillation atmosphérique) : Le pétrole désalinisé est préchauffé, utilisant de la chaleur récupérée du procédé, puis il est porté à ébullition à une température avoisinant les 600 °C et à une pression élevée. La majorité des substances se vaporisent. Les vapeurs entrent dans une tour de fractionnement, par en dessous, et s'y élèvent. Par une différence de température progressive entre la base (600 °C) et le sommet (plus froid), les vapeurs se refroidissent et se condensent, au niveau de la tour où la température correspond à leur point d'ébullition. Ainsi, les différentes fractions du pétrole sont collectées sur des plateaux à des niveaux différents de la tour, la fraction la plus légère, ayant le point d'ébullition le plus bas étant récoltée au sommet, et la plus lourde, ayant le point d'ébullition le plus haut étant récoltée à la base. Il s'agira donc, de haut en bas, de gaz légers (méthane, éthane, propane et butane), de naphta, d'essence, de kérosène, de gasoil ou diesel, de lubrifiant, de gasoil lourd et résiduaire.⁶¹
- la désulfuration

Craqueur : Le naphta issu de la distillation fractionnée est scindé, sous l'effet de la chaleur (vapeur portée aux alentours de 800 °C) et éventuellement à l'aide d'un catalyseur, dans un vapocraqueur, en molécules d'éthylène, de propylène, de butadiène, de gaz de pyrolyse (benzène, toluène, xylène) ainsi que d'autres composés. Ces différents composants sont alors séparés par distillation fractionnée. L'éthylène et les co-produits cités ci-avant peuvent également être obtenus par craquage du gasoil, du butane ou de l'éthane, mais le naphta est la matière première la plus utilisée (73% de la production européenne d'éthylène).

L'éthylène sert d'élément de base pour la production de polyéthylène (pour 50%), mais aussi d'autres produits comme le polystyrène (via l'éthylbenzène et le styrène), le glycol (via l'oxyde d'éthylène), l'acétate de vinyle (via l'acétaldéhyde et l'acide acétique) et le PVC (via le 1-2 dichloroéthane et le chlorure de vinyle).

⁶¹ U.S. DEPARTMENT OF LABOR OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH ADMINISTRATION, *OSHA Technical Manual*, Section IV, Chapter 2: "Petroleum Refining Processes", http://www.osha.gov/dts/osta/otm/otm_iv/otm_iv_2.html.

Avec une capacité de production de 18700 kt par an (chiffre de 1996), il s'agit de l'oléfine la plus importante produite en Europe, avant le propylène⁶².

Production du benzène :

Le benzène produit en Europe provient soit du gaz de pyrolyse (55%) obtenu, comme l'éthylène, par vapocraquage du naphta, du gasoil ou d'autres hydrocarbures, soit du reformage catalytique de l'essence (20%), soit de goudrons ou encore de la transformation chimique d'autres aromatiques (toluène ou xylène).

En Europe, le benzène produit est destiné notamment à la fabrication de styrène (50%), de cumène (21%), de cyclohexane (13% - acide adipique et nylon), de phénol, d'acétone.

Production de l'éthylbenzène:

La production d'éthylbenzène se fait généralement par alkylation du benzène avec l'éthylène.

La synthèse de l'éthylbenzène se produit en phase liquide (c'est actuellement la voie la plus répandue) ou en phase gazeuse, en présence de catalyseurs tels le chlorure d'aluminium ($AlCl_3$) ou des zéolites (par exemple, de l'acide phosphorique sur silicate d'aluminium).

L'éthylbenzène entre principalement dans la production du styrène, mais est également utilisé dans la synthèse de l'oxyde de propylène.

Production du styrène:

Le styrène est produit par déshydrogénation catalytique de l'éthylbenzène. L'éthylbenzène purifié est vaporisé et mélangé à de la vapeur surchauffée. Les catalyseurs utilisés sont généralement à base de composés d'oxydes de fer, parfois de chrome et de potassium. Les produits de la réaction sont condensés et séparés en deux phases : eau et styrène. Le styrène est purifié par distillation sous vide en présence d'inhibiteurs de polymérisation à base de soufre et d'azote. Du benzène, de l'éthylbenzène et du toluène sont récupérés.

Production du polystyrène:

Le styrène, dissous dans une petite quantité d'éthylbenzène, est polymérisé en polystyrène.

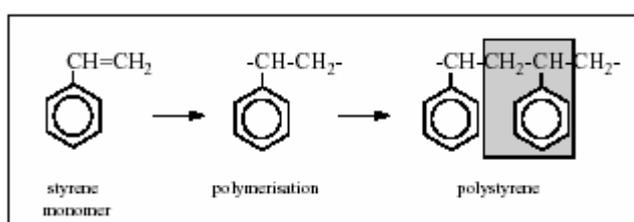


Figure 3.4 Schéma de réaction du polystyrène

3.4 Potentiel d'amélioration du procédé

Les procédés de fabrication de polystyrène et de ses produits intermédiaires n'ont pas beaucoup changé au cours du temps. Les principales améliorations déjà réalisées ou attendues se situent dans le domaine de l'efficacité énergétique

- par le développement de la cogénération dans les industries pétrochimiques ; ces installations, fonctionnant généralement au gaz naturel, permettent de réduire la

⁶² IPPC (February 2003), *Draft Reference Document on Best Available Techniques in the Large Volume Organic Chemical Industry*.

consommation d'énergie de 30% par rapport à la génération séparée d'électricité et de vapeur ;

- par le développement de catalyseurs plus performants, permettant d'abaisser les températures et les pressions nécessaires aux réactions chimiques.

3.5 Fin de vie du produit

Les articles en polystyrène arrivés en fin de vie peuvent suivre trois voies principales : le recyclage, l'incinération (avec récupération éventuelle d'énergie) ou la mise en décharge.

Théoriquement, les polymères thermoplastiques, y compris les polystyrènes, peuvent être recyclés mécaniquement ou convertis chimiquement en matières premières. Toutefois, dans la pratique, le recyclage des plastiques en Europe est souvent limité aux bouteilles en PET et en PEHD, a fortiori dans le cas des déchets ménagers, qui, selon leur application, peuvent être fortement souillés.

Les destinations les plus probables des produits en polystyrène usagers, a fortiori des emballages alimentaires, sont la mise en décharge et l'incinération. En Belgique, près de 90% de l'incinération des déchets municipaux se fait avec récupération d'énergie. Les plastiques sont d'ailleurs de très bons combustibles. Leur valeur calorifique brute (+/- 45 MJ/kg) est très proche de celle du pétrole. L'incinération engendre des cendres en trace, qui doivent être mises en décharge ou peuvent éventuellement être valorisés en cimenterie.

Le polystyrène n'est pas biodégradable et donc certainement pas compostable.

3.6 Facteurs de pression environnementale

a. Consommation de matière

Matière première (hors pétrole) (mg/kg PS)	
Bauxite	960
Soufre (sous forme de SO ₂)	17
Soufre	36
Chlorure de sodium	1.800
Sulphate de calcium	16
Sable	110
Minerai de fer	820
Calcaire	1.300

Tableau 3.1 Matière première hors pétrole et gaz naturel (I. Boustead)

La consommation de pétrole et de gaz naturel comme matière première est reprise dans la rubrique « consommation d'énergie ». On peut toutefois déjà signaler que la production d'1kg de polystyrène nécessite, comme matière première, 32,78 MJ de pétrole brut et 13,46 MJ de gaz naturel, c'est à dire approximativement 710 g de pétrole brut et 290 g de gaz naturel.⁶³

Après le pétrole, les principales matières premières sont des minerais, généralement exploités dans des mines ou des carrières (bauxite, sulphate de calcium, sable, minerai de fer, calcaire).

- La bauxite est la roche exploitée comme minerai d'aluminium. L'aluminium est utilisé notamment pour la construction des équipements de production et de transport (quantitativement, il s'agit surtout des équipements liés à l'exploitation pétrolière et aux transports). Avec le chlore, issu de l'électrolyse du chlorure de sodium, l'aluminium

⁶³ sachant qu' 1 tonne équivalent pétrole = 41.876 MJ (valeur calorifique nette).

entre aussi dans la fabrication des catalyseurs AlCl_3 utilisés dans le procédé de synthèse de l'éthylbenzène.

- Le minerai de fer entre également dans la fabrication de catalyseurs (oxydes de fer).

Sachant que la demande européenne de polystyrène est de l'ordre de 2,7 millions de tonnes, l'activité minière liée à la production (au sens large) du polystyrène est importante. Ses impacts méritent d'être pris en compte.

L'acide sulfurique est fabriqué à partir de soufre et de dioxyde de soufre récupéré des procédés de raffinage de pétrole et de procédés métallurgiques. Les autres matières ont été extraites du milieu.

b. Consommation d'eau :

Eau (litre/kg PS)	
Eau (refroidissement)	170
Eau (procédé)	5

Tableau 3.2 Consommation d'eau (I. Boustead)

On constate que la majeure partie de l'eau prélevée au milieu est destinée au refroidissement.

Pour limiter les risques de contamination, le système de refroidissement est généralement constitué de deux circuits⁶⁴ :

- un circuit primaire, qui peut éventuellement entrer en contact avec les hydrocarbures en cas de fuite ; ce circuit fonctionne en boucle fermée ;
- un circuit secondaire, qui prélève son eau dans le dock et l'y rejette après qu'elle ait été refroidie dans une tour de refroidissement.

Une partie de l'eau s'évapore sous l'effet de la température.

Les effluents de refroidissement peuvent être une source de pollution thermique qui peut perturber l'écosystème aquatique et entraîner une modification des débits.

Les eaux de procédé sont traitées dans une installation de traitement (éventuellement après un prétraitement) avant d'être rejetées dans le milieu.

c. Consommation énergétique :

Globalement, le système utilise 86,28 MJ/kg PS. L'APME subdivise le bilan énergétique du système en 4 catégories :

- Production d'énergie : énergie utilisée par les industries productrices de combustibles lors de l'extraction des vecteurs énergétiques primaires de la terre, de leur transformation et de leur distribution au consommateur final.
- Consommation d'énergie : énergie distribuée au responsable du procédé final qui consomme l'énergie.
- Transport : énergie liée à toutes les formes de transport identifiées au sein du système de production, y inclus les pipelines.
- Matière première : énergie contenue dans les combustibles qui entrent dans le système, mais qui sont utilisées comme matière plutôt que comme combustibles.

⁶⁴ Communication personnelle de BASF Antwerpen, le 2 septembre 2003.

Energie nécessaire (MJ) à la production d'1kg PS

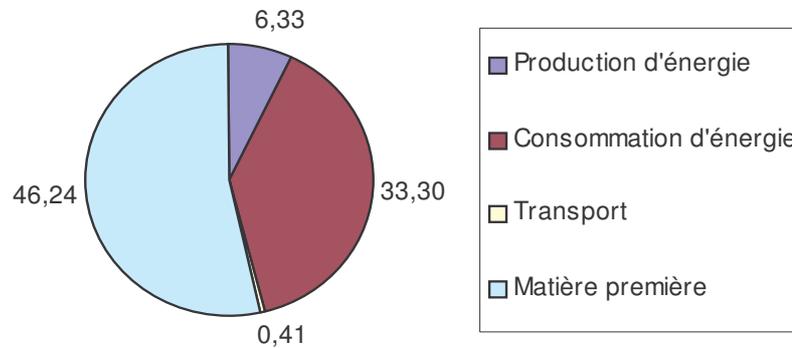


Figure 3.5 Consommation de ressources énergétiques (I. Boustead)

On constate que la matière première absorbe la plus grande part du bilan énergétique (54%), suivie de la consommation d'énergie (39%), puis de la production d'énergie (7%) et du transport (moins d'1%). C'est donc dans l'efficacité énergétique des procédés que résident les plus grands gisements de potentiel d'amélioration, car la consommation de matière première restera identique par définition du système de production du polystyrène.

Le bilan énergétique du produit est évidemment différent lorsque l'on élargit le système à une analyse « cradle to grave » :

ACV « cradle to grave »

Dans une analyse de cycle de vie publiée en 2000¹, comparant les bilans énergétiques du PLA B/WP et du PS du berceau à la tombe, Cargill arrive au constat suivant : la consommation d'énergie fossile du système pour 1000 gobelets en polystyrène, s'élève à

- 1149 MJ à la sortie de l'usine de transformation ;
- 1152 MJ dans l'hypothèse d'une mise en décharge, la différence s'expliquant par les étapes de transport partant de la mise sur le marché des gobelets ;
- 982 MJ dans le cas d'une incinération dans une installation moderne, c'est à dire avec récupération de chaleur ;

De ces trois filières, c'est donc l'incinération avec récupération de chaleur qui est la voie la plus intéressante du point de vue du bilan énergétique du système.

L'option du recyclage n'a pas été prévue dans le cas des gobelets, ce qui indique que cette filière est très peu développée, du moins pour les plastiques ménagers.

Si on décompose le bilan énergétique du système « cradle to pellet » en ses différents vecteurs énergétiques primaires, on obtient les graphiques suivants :

Consommation énergétique hors matière première
(MJ/kg PS)

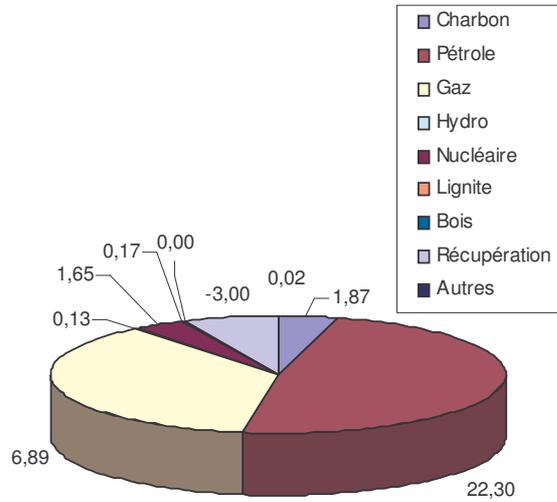


Figure 3.6 Ressources énergétiques, hors matière première, par vecteur énergétique primaire (I. Boustead)

Consommation énergétique totale (MJ/kg PS)
matière première incluse

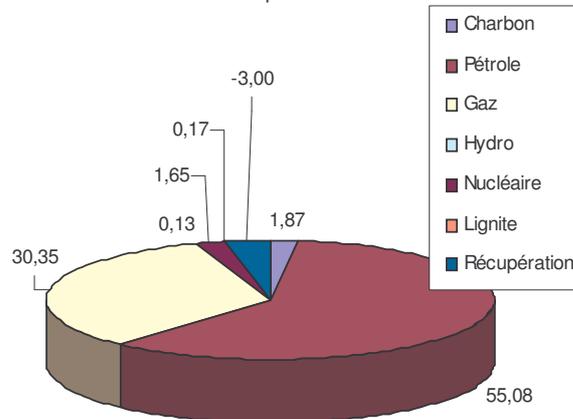


Figure 3.7 Ressources énergétiques par vecteur énergétique primaire (I. Boustead)

Autrement dit, les combustibles fossiles utilisés comme matière première sont le pétrole (71%) et le gaz naturel (29%). La proportion de ces vecteurs énergétiques dans l'ensemble des étapes de production d'énergie, de consommation d'énergie et de transport du système sont : 56% pour le pétrole et 42% pour le gaz naturel.

d. Emissions de gaz à effet de serre

Emissions de gaz à effet de serre (mg/kg PS) (Les totaux peuvent ne pas correspondre en raison des arrondis)					
	Production d'énergie	Consommation d'énergie	Transport	Procédé	Total
CO ₂	470.000	2.100.000	21.000	4.000	2.600.000
Méthane	8.100	2.700	-	200	11.000

Tableau 3.3 Emissions de GES (I. Boustead)

Le dioxyde de carbone est principalement émis par les installations de combustion (fourneaux, chaudières, turbines à gaz), les torchères et les incinérateurs.

Les émissions de méthane sont principalement liées à la production et à la consommation énergétique et, dans une moindre mesure, aux procédés. Ici aussi, on peut s'interroger sur le bilan neutre du transport en matière d'émissions de méthane : les fuites de gaz naturel transporté par pipelines ont-elle été prises en compte ? Etant donné le pouvoir de réchauffement climatique élevé de ce gaz (21 fois celui du CO₂), cette source d'émission peut être, en réalité, plus importante qu'il n'y paraît.

Les émissions de gaz à effet de serre de la production d'1kg de polystyrène s'élèvent à 2,8 kg éq CO₂ si l'on omet les émissions de N₂O. Celles-ci sont toutefois limitées et sont reprises dans les NO_x, comptabilisés dans le tableau suivant (« Autres émissions atmosphériques »).

ACV « cradle to grave »

Dans une analyse de cycle de vie publiée en 2000¹, comparant les bilans énergétiques du PLA et du PS du berceau à la tombe, Cargill arrive au constat suivant : la consommation d'énergie fossile du système pour 1000 gobelets en polystyrène, s'élève à

- 1149 MJ à la sortie de l'usine de transformation ;
- 1152 MJ dans l'hypothèse d'une mise en décharge, la différence s'expliquant par les étapes de transport partant de la mise sur le marché des gobelets ;
- 982 MJ dans le cas d'une incinération dans une installation moderne, c'est à dire avec récupération de chaleur ;

De ces trois filières, c'est donc l'incinération avec récupération de chaleur qui est la voie la plus intéressante du point de vue du bilan énergétique du système.

L'option du recyclage n'a pas été prévue dans le cas des gobelets, ce qui indique que cette filière est très peu développée, du moins pour les plastiques ménagers.

Potentiel d'amélioration

Des améliorations sont attendues notamment de la réduction du recours au flaring du gaz naturel extrait avec le pétrole et de la construction de nouvelles installations de cogénération. Celles-ci permettent de réduire la consommation d'énergie, et par là-même, les émissions de gaz à effet de serre qui y sont liés, de 30% par rapport à la génération séparée d'électricité et de vapeur. L'intégration d'installations de production, comme c'est le cas du secteur anversoïis du raffinage, permet de limiter fortement les transports de produits et permet de nombreuses récupérations de matière, d'énergie et de vapeur par d'autres procédés du complexe pétrochimique. Enfin, comme dans toute industrie, des améliorations sont encore possibles dans le domaine de l'efficacité énergétique, la recherche et le développement de nouvelles technologies.

Dans le cadre de sa politique climatique, le Gouvernement flamand est en passe de conclure des accords de branche avec les entreprises établies en Flandre qui présentent la consommation énergétique la plus intensive. Les entreprises adhérant à ces accords s'engagent à faire partie du top mondial en matière d'efficacité énergétique d'ici 2012.

e. Autres émissions atmosphériques

Autres émissions atmosphériques (mg/kg PS) (Les totaux peuvent ne pas correspondre en raison des arrondis)					
	Production d'énergie	Consommation d'énergie	Transport	Procédé	Total
Poussières	1.100	600	9	17	1.700
CO	220	730	110	22	1.100
SO _x	3.100	7.400	230	85	11.000
NO _x	4.000	7.700	180	97	12.000
HCl	26	<1	-	<1	26
Hydrocarbures	930	430	51	1.400	2.800
HC aromatiques	-	-	-	220	220
HC polycycliques	-	-	-	6	6
Hydrogène	-	-	-	10	10
Métaux	1	8	-	<1	9
Matières organiques	-	-	-	1	1

Tableau 3.4 Autres émissions atmosphériques (I. Boustead)

On peut constater, d'après le tableau, que la production et la consommation d'énergie sont les sources principales d'émissions de poussières, de CO, de SO_x, de NO_x, d'hydrocarbures et de métaux lourds. Dans la raffinerie et l'industrie pétrochimique, les fourneaux, chaudières, incinérateurs et torchères en sont les principales sources. Les gaz et liquides organiques résiduels sont recyclés, utilisés comme fuel ou brûlés dans des torchères, entraînant des émissions supplémentaires. Les unités de récupération de soufre sont quant à elles principalement responsables d'émissions de CO et de SO_x.

EXTRACTION :

Dans certains sites d'extraction, le gaz naturel qui est extrait avec le pétrole est brûlé dans des torchères, entraînant des émissions de CO₂ et de méthane ainsi que de la fumée et de la suie.

Outre les émissions liées aux activités « business as usual » de l'exploitation pétrolière, il faut relever les risques importants de pollution atmosphérique liés aux accidents et aux actes de sabotage. Les feux ont un impact environnemental très important à l'échelle régionale et même à l'échelle mondiale, puisqu'ils contribuent aux phénomènes d'acidification et d'effet de serre. Bien que ces émissions soient difficiles à estimer, leur impact à l'échelle régionale, voire à l'échelle mondiale, sont réels (pluies acides, effet de serre, ...). A titre d'exemple, les émissions engendrées par l'incendie de puits de pétrole au Koweït, lors de la guerre du Golfe en 1991, ont été estimées à 22.000 tonnes de SO₂, 18.000 tonnes de suie et à des milliers de tonnes de CO₂ et de NO_x ainsi qu'à plusieurs tonnes de métaux et de composés cancérigènes par jour et ceci pendant plusieurs mois.

TRANSPORT :

Outre les émissions liées à la combustion (poussières, CO, SO_x, NO_x, hydrocarbures), le transport est responsable d'émissions fugitives d'hydrocarbures sous forme de composés organiques volatils dégagés notamment lors des opérations de transbordement.

RAFFINERIE :

Les émissions liées à la distillation atmosphérique sont principalement des gaz de combustion (CO₂, CO, SO_x, NO_x, hydrocarbures et particules) au niveau du fourneau de préchauffage et des chaudières produisant la vapeur. Les émissions fugitives d'hydrocarbures volatils peuvent également former une source importante de pollution. Au niveau de la distillation, il s'agit notamment de benzène, de toluène et de xylène. Des programmes de détection peuvent permettre de contrôler ces fuites.

PRODUCTION DU STYRÈNE ET POLYMÉRISATION

Outre les émissions liées à la combustion, l'industrie du styrène est une source importante de composés organiques volatils. Ceux-ci trouvent leur origine dans l'évaporation d'hydrocarbures. Les vapeurs s'échappent à différents niveaux : lors du stockage et des opérations de chargement, dans les unités de séparation de gaz, dans les systèmes de séparation eau/hydrocarbure. Il peut également s'agir d'émissions fugitives (au niveau des valves ou des joints par exemple) ou des vapeurs des cuves ou encore des émissions des systèmes de torchères. La production d'éthylbenzène est responsable d'émissions fugitives d'éthylène, de benzène et d'éthylène. Le stockage et les procédés de distillation et de purification du styrène sont responsables d'émissions de benzène, d'éthylbenzène, de toluène et de styrène.

Pour le procédé de polymérisation, l'Agence américaine de protection de l'environnement (EPA) rapporte des émissions de composés organiques volatils (hors méthane), de 0,21 à 3,34 g/kg de polystyrène.

IMPACTS DES ÉMISSIONS HORS GAZ À EFFET DE SERRE

Un grand nombre des substances énumérées dans le tableau sont des substances acidifiantes ou/et précurseurs d'ozone.

- substances acidifiantes : SO₂, NO_x, HCl

Les émissions de SO₂ et de NO_x, avec le NH₃, sont les principales responsables du phénomène d'acidification à l'échelle intersectorielle. Ces émissions peuvent être transportées par le vent sur de longues distances et retomber sur le sol sous forme de retombées humides (« pluies acides ») ou de dépôts secs. L'acidification porte atteinte aux écosystèmes d'eau douce, aux forêts et aux cultures, aux immeubles et monuments culturels, pouvant entraîner des pertes économiques, écologiques et culturelles considérables pour les pays exposés à ce phénomène.

La Fédération Pétrolière Belge, fait état, dans son rapport annuel 2002, d'une chute des émissions de SO₂ en Belgique de 75% entre 1980 et 2002.

- précurseurs d'ozone : NO_x et COV (phénols, benzène, ...)

Les NO_x et de COV réagissent dans la troposphère, sous l'effet du rayonnement solaire, pour former l'ozone, un photo-oxydant qui des effets néfastes sur la santé (affection des voies respiratoires, irritation des yeux, toux), sur l'environnement (diminution de l'activité photosynthétique et diminution corollaire de la croissance et du rendement) et sur les matériaux. De plus, l'ozone joue un rôle dans le renforcement de l'effet de serre.

Par ailleurs, un grand nombre des substances listées dans le tableau ont des effets néfastes sur la santé, dont le SO₂, les HAP, les métaux lourds. Ces effets sont décrits dans le paragraphe « Toxicologie ».

Potentiel de réduction

SO_x : Les émissions de SO_x dépendent de la teneur en soufre du combustible. Les normes de plus en plus sévères en cette matière conduisent à une baisse de ces émissions.

COV : Des moyens de réduire les émissions fugitives de composés organiques volatils sont par exemple l'inspection régulière des équipements pour détecter les fuites éventuelles, l'application d'enduits réfléchissants pour éviter les pertes par évaporation, la récupération des vapeurs d'hydrocarbures dégagées dans les tours de stockage (« vent recovery »), ou l'investissement dans un couvercle flottant, pour ces mêmes installations.

Même si des réductions sont techniquement possibles, il faut cependant rester attentif à l'aspect économique. Sous une réglementation de plus en plus stricte, les entreprises

craignent pour leur compétitivité. Il y a donc bien une limite économique, dictée par la concurrence, et le danger est bien présent d'assister à des délocalisations, et avec elles, à des augmentations de pollution, si le pays d'accueil est beaucoup plus laxiste. L'outil normatif a donc ses limites.

Par ailleurs, l'application des technologies « end-of-pipe » peut donner l'illusion de résoudre des problèmes de pollution, alors qu'en réalité, elle déplace le problème d'un compartiment de l'environnement à un autre (par exemple, la transformation des émissions de poussières en déchets solides dans le cas de l'usage de filtres électrostatiques, ou encore des émissions dans l'eau en émissions atmosphériques ou en déchets solides dans le cas de l'épuration des eaux).

f. Emissions dans l'eau

Rejets dans l'eau (mg/kg PS) (Les totaux peuvent ne pas correspondre en raison des arrondis)					
	Production d'énergie	Consommation d'énergie	Transport	Procédé	Total
DCO	6	-	-	370	370
DBO	5	-	-	46	51
Acides (H ⁺)	<1	-	-	42	43
Solides dissous	57	-	-	53	10
Hydrocarbures	24	<1	-	69	92
NH ₄ ⁺	<1	-	-	9	9
Solides en suspension	20	-	-	270	290
Phénol	5	-	-	<1	5
Na ⁺	-	-	-	490	490
Autres ions métalliques	<1	-	-	430	430
NO ₃ ⁻	-	-	-	2	2
Autres composés azotés	-	-	-	7	7
Cl ⁻	-	-	-	5.600	5.600
SO ₄ ⁻⁻	-	-	-	160	160
Huile	-	-	-	69	69
Composés organiques dissous	-	-	-	31	31
Autres composés organiques	-	-	-	2	2
Soufre	-	-	-	<1	<1

Tableau 3.5 Emissions dans l'eau (I. Boustead)

La présentation de ces données sous format agrégé pour l'ensemble du système de production de polystyrène n'a pas beaucoup de sens dans le cadre de l'évaluation de leurs impacts sur l'environnement, étant donné que l'importance des effets dépend de la concentration de la pollution. Il permet toutefois d'identifier les principales substances en présence dans les effluents.

On constate que la majeure partie des rejets dans l'eau sont attribuables aux procédés de production. A trois exceptions près (solides dissous, hydrocarbures et phénol), la production et la consommation d'énergie et le transport sont responsables d'une part négligeable de la pollution des eaux.

A la vue du bilan nul du transport, on peut légitimement se poser la question dans quelle mesure les pollutions diffuses ou accidentelles ont été prises en compte dans l'analyse de cycle de vie réalisée par l'APME. Plus particulièrement, les fuites d'hydrocarbures au niveau des plate-formes de forages ou lors du transport du pétrole brut par les pétroliers ont-elles été estimées et comptabilisées ? Il s'agit d'une source de pollution potentiellement

importante, d'autant plus qu'elle est concentrée dans le temps et dans l'espace dans le cas des marées noires, avec des conséquences catastrophiques pour les écosystèmes locaux.

EXTRACTION :

En mer, la production de pétrole utilise près de 1514 m³ d'eau par jour, relargués directement dans l'océan. L'extraction des hydrocarbures on-shore engendre de 230 à 1130 m³ de boues par jour, qui sont rejetées sur le sol. L'eau utilisée lors de l'extraction, est contaminée par des métaux lourds, des composés organiques comme le benzène, le toluène et le xylène, et d'autres composés toxiques. Les techniques de traitement de ces eaux sont fort coûteuses et ne sont utilisées que sélectivement.

Le pétrole et les produits issus de son extraction (boues, eaux, ...) contiennent des composés chimiques qui peuvent avoir des effets néfastes sur les écosystèmes et sur la santé:

- les hydrocarbures aromatiques peuvent avoir des effets sur les cycles hormonaux des êtres vivants (perturbateurs endocriniens) et peuvent causer des cancers : les travailleurs dans le secteur de la pétrochimie et la faune aquatique à proximité des sites de forage off-shore sont exposés ;
- des matériaux naturellement radioactifs, comme le radium, peuvent être amenés à la surface lors de l'extraction et peuvent contaminer l'eau : les travailleurs et la population locale sont exposés ;
- les fuites de pétrole ont des effets néfastes sur les écosystèmes marins : hausse de mortalité chez certaines espèces vulnérables (phoques, loutres, baleines, tortues de mer, oiseaux de mer), bioaccumulation de substances toxiques dans la chair de poissons et de mammifères consommés par l'homme, diminution des pêches et donc impact économique ;
- les fuites de pétrole sur terre peuvent contaminer le bétail, lorsque celui-ci est exposé (par contamination directe ou par contamination de l'eau ou de la nourriture) et, ingéré en grande quantité, peuvent entraîner la mort soudaine de l'animal ;
- le mercure rejeté avec les boues à proximité des côtes est concentré dans la chair des poissons et peut constituer une menace pour les populations locales qui se nourrissent de la pêche : c'est un neurotoxique.

TRANSPORT :

Etant donné les distances importantes entre les sites d'extraction et les raffineries, les risques d'accidents lors des trajets en sont accrus. Depuis les années 1960, on a connu chaque année des marées noires de plus de 40 millions de litres de pétrole suite à des accidents de pétroliers. L'actualité en atteste, avec l'accident de l'Erika, en décembre 1999, à proximité des côtes bretonnes, et celui du Prestige, en novembre 2002, qui a déversé en mer sa cargaison de 77.000 tonnes d'hydrocarbures.

Si l'ampleur de ces sources ponctuelles peut être estimée, il n'en va cependant pas de même des plus petits accidents ou des vidanges illicites effectuées régulièrement en mer. Or, si on ajoute les pertes provenant de fuites de pipelines, de l'extraction, du raffinage, ces sources de pollution aux hydrocarbures sont probablement les plus importantes.

Une estimation avancerait le chiffre de « 3,5 millions de tonnes rejetées volontairement ou accidentellement chaque année dans le monde, dont 1,6 millions de tonnes d'hydrocarbures via les fleuves qui charrient les pertes diverses de carburants (effluents des raffineries, huiles de moteurs, pertes d'essence ou de gazole, ...).⁶⁵

⁶⁵ MINISTÈRE FRANÇAIS DE L'ÉCOLOGIE ET DU DÉVELOPPEMENT DURABLE (2000), « Impacts du naufrage de l'Erika : quelques éléments de connaissances », 4 février 2000, <http://www.environnement.gouv.fr>.

Il arrive également que des pipelines prennent feu ou explosent. Le mauvais entretien et la vétusté des installations sont souvent à l'origine de ces accidents. Les compagnies négligent de remplacer les conduites tous les 15 ans pour des raisons évidentes de coût.

Les marées noires ont un impact direct sur les écosystèmes marins. Des animaux meurent par ingestion. Des oiseaux meurent englués dans le pétrole ou par hypothermie. En outre, de nombreux hydrocarbures sont présumés cancérogènes. Les populations de poissons et les écosystèmes côtiers peuvent également être lourdement affectés.

Les fuites d'hydrocarbures sur terre posent des problèmes de contamination du sol et de l'eau souterraine, rendant les terres impropres à la culture et l'eau impropre à la consommation. C'est donc la population locale qui est la première victime.

RAFFINERIE :

La distillation fractionnée consomme de grandes quantités d'eau, qui entrent en contact direct avec le pétrole et ses fractions et est donc fortement contaminée. Ces effluents acides contiennent principalement du sulfure d'hydrogène, de l'ammoniaque, des solides en suspension, des chlorures, des mercaptans et des phénols. Ils sont traités de manière à séparer l'eau du pétrole dans un premier temps et à enlever le sulfure d'hydrogène, les composés organiques soufrés et l'ammoniaque ensuite, avant de traiter les effluents dans l'installation de traitement des eaux. Ces opérations engendrent des déchets dangereux.

PRODUCTION DU STYRÈNE :

Les procédés de production d'éthylbenzène et de styrène sont responsables d'effluents chargés en benzène (eau de déshydratation) et en benzène, éthylbenzène, toluène et styrène (condensats de vapeur), d'effluents de neutralisation, de rejets d'eaux de refroidissement. Les condensats sont débarrassés des gaz légers avant d'être conduits vers une installation de traitement biologique centrale.

Dans la raffinerie et les installations pétrochimiques, on peut distinguer trois sources d'effluents :

- les eaux de procédé et de lavage : ces eaux ont été en contact avec les fluides du procédé et sont chargés d'hydrocarbures, de H₂S, d'ammoniaque (NH₃) et de phénols. Ces eaux de procédé sont traitées avant d'être rejetées dans l'environnement ;
- les eaux de refroidissement : en théorie, elles ne rentrent pas en contact avec les fluides du procédé ; cependant, des fuites peuvent survenir : l'eau de refroidissement peut être utilisée en boucle, moyennant l'addition d'eau fraîche pour compenser les pertes dues notamment à l'évaporation ; dans le cas d'une utilisation unique, l'eau rejetée peut être contaminée par ces fuites ; elle engendrera de plus une pollution thermique susceptible de causer des perturbations de l'écosystème aquatique ;
- les eaux de pluie : elles peuvent être contaminées par contact avec des surfaces polluées, auquel cas elles sont généralement traitées avant d'être rejetées.

g. Déchets solides

- Déchets du système « cradle to pellet » :

Déchets solides (mg/kg PS) (Les totaux peuvent ne pas correspondre en raison des arrondis)				
	Production d'énergie	Consommation d'énergie	Procédé	Total
Minéraux	14.000	-	4.200	18.000
Mélange industriel	510	-	1.200	1.800
Cendres	2.900	33	470	3.400
Déchets chimiques inertes	<1	-	2.300	2.300
Déchets chimiques réglementés	20	-	810	830
Non spécifiés	<1	-	16	17
Construction	-	-	29	29
Métaux	-	-	11	11
A incinérer	-	-	3.800	3.800
Emballages	-	-	3	3

Tableau 3.6 Déchets solides (I. Boustead)

DÉCHETS MINÉRAUX :

La masse la plus importante des déchets est constituée de minéraux. Les déchets minéraux répertoriés dans la rubrique « production d'énergie » représentent les quantités de terre et de roche extraites lors des opérations d'extraction. L'APME précise que les minerais extraits sont généralement réenfouis dans la mine après que les minéraux recherchés aient été extraits.

Les déblais de forage des puits de pétrole connaissent une destinée différente selon la réglementation de l'endroit. Dans son rapport environnemental de 2001, TotalFinaElf explique qu'en Mer du Nord, où la réglementation interdit le rejet des boues de forage sur les fonds marins, celles-ci sont réinjectées dans le réservoir. Au Venezuela, les boues des forages on-shore subissent un traitement biologique en surface. Ces techniques ne sont toutefois pas appliquées partout, et la voie la plus facile en l'absence de réglementation et de contrôles reste le rejet direct dans l'environnement. Quoi qu'il en soit, les impacts ne sont jamais nuls, car les sols, le déplacement de ces masses de matière provoque des perturbations dans la structure des sols ou des fonds marins et des écosystèmes locaux.

MÉLANGE INDUSTRIEL :

L'APME précise qu'il s'agit des déchets de maintenance générale qui ne tombent pas dans d'autres catégories.

CENDRES :

La production d'énergie (boilers, fourneaux) génère une masse importante de cendres. Celles-ci sont généralement valorisées en cimenterie.

BOUES :

La raffinerie et la pétrochimie doivent aussi se débarrasser des résidus de colonne de distillation, des boues huileuses issues notamment de la désalinisation, des fonds de cuves, du traitement des eaux, des traitements biologiques, des sols contaminés. Ces boues contiennent donc des matières organiques. Elles sont généralement incinérées dans une installation spécialisée, sous conditions contrôlées, avec récupération de

chaleur⁶⁶. Les cendres issues de l'incinération de ces boues doivent être mises en décharge.

DÉCHETS CHIMIQUES ET MÉTAUX :

Parmi les déchets solides, on trouve aussi notamment:

- les catalyseurs métalliques utilisés dans les unités de craquage catalytique, de désulfuration, dans les unités de production d'éthylbenzène, de styrène et de polystyrène. Ils sont généralement régénérés après quelques années par des firmes spécialisées, qui récupèrent les métaux et se débarrassent des déchets inertes en décharge.
- divers produits chimiques : caustiques, acides, additifs, carbonate de sodium, solvants, résines,

DÉCHETS DIVERS :

Des métaux, du verre, des plastiques, des peintures, des déchets de construction ou de démolition sont également produits par le système.

Les industriels font généralement appel à des entreprises tierces spécialisées pour s'occuper du traitement de leurs déchets en dehors du site. L'écoprofil réalisé par l'APME se limite à rapporter les déchets dans l'état dans lequel ils se trouvent lorsqu'ils quittent le site de production, en donnant peu de précisions sur la nature des déchets et sur leur devenir, à l'exception de l'incinération. Or, pour être exhaustive, une analyse de cycle de vie devrait poursuivre l'étude jusqu'à la destinée « ultime » du déchet, à savoir les émissions dans l'air et les cendres dans le cas de l'incinération, les déchets solides traités et mis en décharge, l'entrée du déchet dans un circuit de valorisation. Elle devrait aussi prendre en compte la consommation (ou les économies) de matière, d'énergie et les émissions que ces diverses filières engendrent.

La part des déchets valorisables est particulièrement intéressante à connaître, car ces substances passent du statut de déchet au statut de produit dès qu'elles entrent dans le circuit de valorisation.

- Polystyrène en fin de vie

Le problème posé par les objets en polystyrène en fin de vie est surtout un problème d'espace. Le produit est inerte et ne pose pas de danger toxicologique. Cependant, l'augmentation de la consommation de plastiques conduit à une masse de déchets de plus en plus importante dont il faut se débarrasser. Les capacités des usines d'incinération sont limitées, et les décharges arrivent à saturation. L'objectif de l'Union européenne en matière de gestion de déchets est de donner la priorité aux voies de récupération (matière et énergie) et de limiter à un minimum la mise en décharge. Le recyclage matière butte cependant souvent contre des obstacles techniques, économiques, voire environnementaux (par exemple, la consommation et la pollution de l'eau) :

L'homogénéité, la propreté et la rigidité des bouteilles et flacons sont les éléments qui « limitent » les coûts de collecte et de tri. Le recyclage des autres emballages en plastique usagés aurait un coût nettement plus élevé et un impact plus négatif sur l'environnement. Leur valorisation énergétique dans les incinérateurs ménagers par exemple reste le meilleur moyen économique et écologique de les valoriser.⁶⁷

⁶⁶ Il s'agit d'entreprises du type Indaver, en Belgique.

⁶⁷ FOST Plus (2001), *Rapport annuel 2000*, avril 2001.

En Belgique, les bouteilles et flacons en PET et en HDPE sont les seuls déchets plastiques ménagers qui sont recyclés.

h. Contamination des sols

Les sites d'extraction du pétrole et de nombreux sites de raffinage ont été contaminés par des fuites historiques d'hydrocarbures. Les risques de contaminations sont associés à l'extraction, au stockage, au transfert et au transport des hydrocarbures ou des eaux chargées en hydrocarbures. Des contaminations par les catalyseurs sont également possibles.

EXTRACTION PÉTROLIÈRE ET TRANSPORT

L'extraction et le transport terrestres du pétrole sont des opérations qui ne se font pas toujours avec les précautions requises. Les fuites des puits de forage et des pipelines peuvent contaminer les terres et les sources d'eau, entraînant des risques sanitaires pour la population locale, voire des décès chez le bétail ingérant de l'eau ou de la nourriture contaminée.

SITES PÉTROCHIMIQUES

Les pratiques actuelles tendent à prévenir les fuites sur les sites, mais les contaminations historiques restent un problème.

i. Toxicologie

Un grand nombre de produits intermédiaires de la production du polystyrène ont une toxicité aiguë et chronique établie. Ils imposent la prise d'un certain nombre de précautions par les personnes qui y sont exposées de par leur profession : port de lunettes, du masque, de vêtements de protection, bonne ventilation, bonne hygiène. Les maladies liées à l'exposition aux hydrocarbures sont principalement des maladies de la peau, des poumons et des cancers.

Effets de certains hydrocarbures et limites d'exposition au lieu de travail⁶⁸

- benzène :
 - effets à court terme : irritation de la peau et des voies respiratoires, atteinte au système nerveux central, évanouissement
 - effets à long terme : attaque la couche lipidique de la peau, effets sur les organes hématopoïétique, le foie et le système immunitaire, effets cancérigènes
 - TLV : 10 ppm (1991-1992).
- éthylbenzène :
 - effets à court terme : irritation des yeux, de la peau et des voies respiratoires, atteinte au système nerveux central, évanouissement
 - effets à long terme : dermite
 - TLV : 100 ppm; STEL : 125 ppm (1994-1995); MAK: 100 ppm (1994).
- styrène :
 - effets à court terme : irritation des yeux, de la peau et des voies respiratoires, évanouissement
 - effets à long terme : dermite, sensibilité de la peau, asthme, neurotoxicité, cancérogénicité et génotoxicité probables⁶⁹.

⁶⁸ Base de donnée INCHEM (IPCS : International Programme on Chemical Safety)
note : TLV=Threshold Limit Value ; STEL= Short term exposure limit ; MAK= Maximale Arbeitsplatzkonzentration

⁶⁹ WHO Regional Office for Europe (2000), *WHO air quality guidelines*, 2nd edition, Copenhagen, <http://www.who.dk>.

- TLV : 50 ppm ; STEL : 100 ppm (1993-1994).⁷⁰

Effets d'autres polluants:

- HAP : il en existe des centaines ; le plus connu et le plus étudié est le benzo[a]pyrène des études sur des animaux ont indiqué des effets néfastes de plusieurs HAP : immunotoxicité, génotoxicité, carcinogénicité et troubles de la reproduction pour l'homme, l'OMS considère que certains HAP sont des cancérigènes potentiels ; leur cancérogénicité pourrait être exacerbée par les particules inhalées sur lesquelles elles sont adsorbées⁷¹
selon l'OMS, la nourriture est la principale voie d'absorption d'HAP (formés lors de la cuisson ou par dépôt sur les végétaux lors de la culture)
risques accrus de cancers du poumon lors d'exposition par inhalation dans l'atmosphère, ils sont adsorbés sur des particules
- SO_x, NO_x, micro-particules (PM) : effets cardiovasculaires et respiratoires
- PM et poussières : effets toxiques indirects, via l'adsorption de micro-polluants (métaux lourds, polluants organiques persistants) :
 - les dépôts de poussières chargées de métaux, présentent un danger via l'accumulation de ces éléments dans le sol, dans l'eau et dans la chaîne alimentaire
 - les particules microscopiques peuvent être ramenées au sol par les précipitations ou être inhalées, entraînant des impacts sur la santé ; émises en forte concentration et en combinaison avec le SO₂ lors des épisodes de smog d'hiver, elles augmentent les risques de maladies respiratoires et cardiaques
- CO : augmentation des risques cardiovasculaires et neurologiques
- métaux : effets spécifiques très divers (troubles nerveux, allergies, troubles respiratoires, affections cardio-vasculaires, anémie, affections du foie, de la moelle osseuse, effets cancérigènes, ...) et, pour certains, bio-accumulation.

Des valeurs MAC (« maximum acceptable concentrations ») légalement contraignantes ont été établies pour la plupart de ces substances.

Les raffineries et les industries pétrochimiques ont réalisé des efforts importants ces trente dernières années pour renforcer la sécurité des travailleurs, par le biais de formations, des équipements de protection plus sûrs, le renforcement de la communication en matière de procédures à suivre pour les opérations ou en cas d'accidents. Ces précautions ont permis de réduire le nombre d'accidents et de cas de maladie au cours des années. En attestent les bilans affichés dans les rapports annuels de ces entreprises. Il faut également noter que, dans les sites de production pétro-chimiques, les opérations sont menées à partir d'une chambre de contrôle et la présence humaine à proximité directe des équipements est très réduite.

j. Sécurité

L'industrie pétrolière et pétrochimique a connu de nombreux accidents historiques, allant de l'explosion de plate-formes pétrolières à celle de raffineries et d'usines pétrochimiques, en passant par les accidents de pétroliers. Toutes ont eu des effets très néfastes sur l'environnement, en raison de la toxicité des produits émis. Les accidents occasionnant des blessés ou des morts sont également réguliers.

Le pétrole et ses dérivés sont particulièrement inflammables, voire explosifs. C'est notamment le cas de l'éthylène et du benzène, qui sont des gaz extrêmement explosifs en mélange avec l'air, et de l'éthylbenzène et du styrène.⁷² Ce dernier dégage des fumées

⁷⁰ INCHEM

⁷¹ WHO Regional Office for Europe (2000), *WHO air quality guidelines*, 2nd édition, Copenhagen, <http://www.who.dk>.

⁷² INCHEM

toxiques lorsqu'il prend feu. En mélange avec l'air, ses vapeurs sont explosives au-dessus de 31 °C.

Depuis l'application de la Directive Seveso, les accidents dans le secteur du raffinage et de la pétrochimie sont mieux contrôlés et mieux gérés. Toutefois, la dangerosité des substances mises en œuvre dans les procédés pétrochimiques représentera toujours un facteur de risque inévitable.

Les impacts environnementaux de l'extraction et du transport du pétrole sont beaucoup moins bien contrôlés. Ces activités ont généralement lieu en dehors du territoire européen, dans des régions qui échappent au champ d'action de l'Union européenne.

EXTRACTION

A côté des contaminations chroniques, l'exploitation pétrolière est une activité qui comporte de hauts risques pour les travailleurs, en raison des conditions d'exploitation particulièrement dures et de l'inflammabilité du pétrole. L'exploitation du pétrole et du gaz sont les activités les plus dangereuses de l'industrie pétrolière et comptent plus d'accidents mortels que toutes les autres industries des Etats-Unis ensemble. Le nombre de jours d'incapacité de travail dus à des accidents de travail dans l'industrie de l'extraction du pétrole et du gaz est également beaucoup plus élevé que dans l'industrie privée (d'un facteur 2,8)⁷³. Parmi les accidents les plus graves, P. R. Epstein & J. Selber notent: les explosions de puits, l'écroulement de plateformes, les collisions avec des bateaux, les ruptures de pipelines, les accidents lors de transferts de pétrole ou de gaz, les feux et les explosions.

Un grand nombre d'exploitations se font dans des pays où les conditions de travail sont précaires, où les droits de l'homme sont bafoués et où la réglementation environnementale est très laxiste, voire inexistante, comme par exemple au Nigéria, en Equateur ou au Mexique. Les risques d'accidents, de maladies et de pollutions y sont fortement accrus.

TRANSPORT

Dans le domaine du transport des produits pétroliers, les accidents ont principalement des implications pour les écosystèmes marins. Ici aussi, la maîtrise de ces accidents semble difficilement réalisable. D'une part, parce que le transport traverse différents territoires, d'autre part parce que les responsabilités en cas d'accidents sont mal définies. Dans ce contexte d'insécurité juridique, l'exploitant, poussé par sa recherche du maximum de profit, prend donc logiquement des risques. De nombreuses pollutions sont dues aux vidanges, aux fuites, aux accidents dus à la vétusté des pétroliers.

Les mesures de protection existantes visent davantage à réparer, voire « compenser » les dégâts qu'à les éviter. Par exemple, un Fonds international d'indemnisation pour les dommages dus à la pollution par les hydrocarbures (FIPOL) existe depuis 1971.

Suite aux récents accidents de l'Erika, puis du Prestige, on assiste cependant à une volonté européenne de renforcer la réglementation sur la sécurité maritime. Deux directives, l'une sur le renforcement du contrôle par l'Etat du port dans l'UE, l'autre sur le renforcement du suivi de l'activité des sociétés de classification sont entrées en vigueur le 22 juillet 2003. Une proposition de règlement devrait être adoptée prochainement sur l'interdiction du transport du pétrole lourd dans les pétroliers à simple coque. Une autre proposition de directive vise à instaurer un règlement de sanctions pénales en cas d'infractions de pollution. La Commission a, de plus, publié une liste des navires interdits d'accès aux ports de l'UE.⁷⁴

⁷³ EPSTEIN Paul R. and SELBER Jesse (2002), *Oil: A life cycle analysis of its health and environmental impacts*, The Center for Health and the Global Environment, Harvard Medical School, Boston.

⁷⁴ COMMISSION EUROPEENNE, « Entrée en vigueur de la législation « Erika I » sur la sécurité maritime : la Commission poursuit 10 Etats membres », Communiqué, IP/03/1116, Bruxelles, le 25 juillet 2003

k. Utilisation d'espace

L'exploitation pétrolière off-shore peut être considérée comme nulle du point de vue de l'occupation d'espace. La situation est différente et peut être plus problématique pour l'exploitation on-shore.

Si les installations de raffinage et les sites pétrochimiques s'étendent sur de larges superficies, on notera toutefois qu'ils combinent des opérations multiples et très complexes, ce qui en fait des utilisateurs d'espace économiquement très efficaces. Pour des raisons de facilité d'approvisionnement (en matière première et en eau), ces installations sont généralement situées à proximité des côtes.

La mise en décharge des déchets (aussi bien les déchets issus de la production – minéraux, cendres, ... - que les déchets du produit en fin de vie) peut poser un problème d'espace, plus particulièrement dans des petits pays comme la Belgique.

Les déchets des procédés sont de plus en plus valorisés. L'incinération est la seconde voie de traitement, suivie en dernier recours par la mise en décharge.

A titre indicatif, BASF, rapporte les chiffres suivants, pour l'ensemble de son site d'Anvers⁷⁵ :

	1992	2000
valorisation	51,4%	86,4%
incinération	22%	12,2%
mise en décharge	26%	1,4%

Tableau 3.7 Evolution des modes de traitement des déchets (BASF Antwerpen)

En ce qui concerne le traitement des articles en polystyrène en fin de vie, la voie de l'incinération est la première voie choisie, à défaut de la pratique du recyclage pour ce type de plastique. Les capacités des installations étant limitées, une part de ces déchets continue toutefois à être mise en décharge, où ils s'accumulent, causant des problèmes d'espace. En attestent les données de l'INS, pour l'ensemble des déchets municipaux en Belgique. Il faut préciser que les plastiques représentent environ 4,5% du poids des de ce déchets (INS):

	1995	1998	2001
Compost	331	835	878
Incinération	1638	1531	1718
dont avec récupération de chaleur	1254	1298	1533
Décharge (y incl. scories d'incinération)	2381	1772	1388
Recyclage	1012	2063	2308

Tableau 3.8 Déchets municipaux : élimination et recyclage (ktonnes) (INS estimations)

l. Paysages

L'extraction du pétrole on-shore et les aménagements routiers spécialement conçus pour accéder aux sites ont un effet particulièrement destructeur sur les paysages et les écosystèmes naturels, notamment les forêts tropicales. Pour ce qui est des raffineries et des entreprises pétrochimiques, même si elles peuvent être considérées comme un élément perturbateur de la vue, du fait de leurs installations métalliques très hautes, leur impact sur le paysage est plus limité, du fait de leur concentration dans des zonings le long de ports et de canaux. On peut citer le cas notamment du grand complexe pétrochimique d'Anvers (BASF, Exxon, Atofina, ...), ou de Houston, aux USA. L'effet de dénaturation du paysage est donc concentré géographiquement en certains pôles industriels.

⁷⁵ BASF Antwerpen N.V. (2003), *Responsible Care-rapport 2002*.

Des efforts semblent être entrepris par des sociétés comme TotalFinaElf pour tenter de rétablir les paysages et de réhabiliter les sites industriels arrivés en fin de vie. Dans son rapport environnemental 2001, TotalFinaElf évoque notamment le projet de reforestation d'une forêt tropicale au Gabon, au niveau d'un ancien site d'exploitation et des routes d'accès.

m. Biodiversité

Les atteintes à la biodiversité commencent à l'exploration des gisements de pétrole. Même si les techniques de détection des réserves de pétrole se sont améliorées depuis le temps des forages aléatoires, permettant ainsi de réduire le taux d'erreur d'estimation, l'efficacité des techniques actuelles (photographies aériennes et images-satellites combinées aux tests au sol), n'est toutefois encore que de 60%. Or, cette étape de détection au sol cause déjà des dommages importants à l'environnement. Elle implique des poids lourds et des équipements de forage pouvant peser plus de 1000 tonnes. Outre les vibrations provoquées volontairement pour détecter les réserves de pétrole, cet apport de matériel entraîne des perturbations à l'écosystème : bruit, vibrations, boue, création de tranchées, compactage du sol. L'utilisation d'explosifs, pour fracturer des couches géologiques afin d'accéder à la réserve de pétrole, entraîne des perturbations supplémentaires.

Les impacts sont différents selon que l'exploitation se fait sur terre (on-shore) ou en mer (off-shore). L'exploitation du pétrole on-shore se fait souvent dans des lieux naturels, éloignés des civilisations urbaines, nécessitant souvent la déforestation et la construction de routes, dénaturant et fragmentant le paysage et perturbant les écosystèmes locaux.

Le transport peut porter atteinte aux écosystèmes lors de dysfonctionnements (fuites, incendies, ...).

Les perturbations engendrées par les étapes suivantes sont surtout de nature toxicologique et thermique (contamination par les hydrocarbures, les métaux lourds, influence du pH et de la température des eaux, ...).

4. EVALUATION COMPARATIVE ET DISCUSSION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DE LA PRODUCTION DE POLYACIDE LACTIQUE ET DE POLYSTYRÈNE

Tout d'abord, je me dois d'insister sur la difficulté d'effectuer une comparaison entre les deux systèmes étudiés du fait de différences fondamentales à trois niveaux :

1. au niveau de la géographie des systèmes :

PLA : modèle « Cargill Dow », très autonome

source d'approvisionnement et entreprise de production, rassemblant toutes les étapes intermédiaires, sont réunies dans un même secteur géographique

PS : réseau d'entreprises dispersées géographiquement, situées le long des côtes ou le long de voies navigables, reliées entre elles par pipelines ou approvisionnées par bateaux

Cette différence structurelle se reflète dans les étapes de transport, qui sont très réduites dans le cas du système de production de Cargill Dow. Lors de la discussion finale, nous étudierons la faisabilité d'un tel système dans un contexte européen.

2. au niveau de la nature des activités impliquées:

- extraction de la matière première :

PLA : culture

PS : extraction pétrolière

- transport :

PLA : principalement par voie terrestre (camion)
 PS : principalement par voie maritime et fluviale et par pipeline

- procédé de production :
 - PLA : procédé biochimique
 - PS : procédé pétrochimique
- les étapes de transformation, de distribution et de consommation ne sont pas fondamentalement différentes, sinon que le compounding du PLA nécessite probablement l'ajout d'additifs différents du PS en raison de ses caractéristiques différentes et en vue de sa conformité à la norme de compostage
- destinée du produit en fin de vie :
 - PLA : compostage / incinération / décharge
 - PS : incinération / décharge

Ces différences dans la nature des activités se traduisent par des différences dans la nature et dans l'ampleur des impacts sur l'environnement

3. au niveau de la nature des substances mises en jeu :

PLA : principalement des ressources vivantes, renouvelables (plantes comme matière première, micro-organismes comme catalyseurs)

PS : principalement des ressources fossiles et minérales (pétrole et gaz naturel comme matières premières, métaux comme catalyseurs)

La nature des matières premières influe directement sur la nature des déchets de production.

Tenant compte de ces nombreuses divergences entre les deux systèmes de production et des obstacles méthodologiques expliqués dès le début de cet ouvrage, le présent chapitre n'a pas la prétention de dresser une comparaison pointilleuse entre l'analyse de cycle de vie du polyacide lactique et celle du polystyrène, mais bien de fournir des pistes de réflexion et de relever les éléments auxquels il faut être attentif. Comme annoncé dans l'introduction, je tenterai une comparaison qualitative des deux produits du point de vue de leur viabilité environnementale, en juxtaposant les sources de pollution, paramètre par paramètre, pour aboutir à une grille d'appréciation, moyennant toutes les réserves qui s'imposent en raison du manque d'information, de recul et d'exemples illustratifs de systèmes de production de polyacide lactique.

4.1 Consommation de matière

La consommation de matière renouvelable, et par là, l'indépendance par rapport aux réserves fossiles, constitue un des principaux avantages du procédé de production de polyacide lactique. De ce point de vue, cela en fait un procédé durable, puisque la biomasse est théoriquement une ressource illimitée, tandis que les réserves de pétrole sont amenées à se tarir.

	PLA	PLA B/WP	PS
+	ressources renouvelables (cultures, micro-organismes)	ressources renouvelables (biomasse, micro-organismes)	
-			ressources non renouvelables (pétrole, gaz naturel, minerais)

Tableau 4.1 Consommation de matière PLA – PLA B/WP - PS

Il faut toutefois relever l'importance des autres substances utilisées dans le processus, et s'intéresser aux impacts liés à l'exploitation de ces ressources. Si la culture peut paraître être une activité « douce » par rapport à l'exploitation pétrolière et minière, qui défigurent le paysage, perturbent les écosystèmes, sont source de contamination par les hydrocarbures et les métaux et comportent une part de danger importante pour les ouvriers et la population locale, il faut être prudent et noter que la culture, et a fortiori la culture du maïs, est également une source importante de pollution et d'appauvrissement de la biodiversité, par l'effet des pesticides et des nitrates. On pourrait même avancer que le caractère « renouvelable » de la culture est pervers, car, les terres pouvant être exploitées pendant des décennies, les polluants organiques persistants et les métaux lourds introduits par l'activité agricole s'y concentrent ou s'accumulent dans la chaîne trophique locale, amplifiant ainsi les risques toxicologiques.

Les pratiques utilisées jouent un rôle très important, tant pour l'activité extractive que pour l'agriculture. L'application de bonnes pratiques pourrait réduire fortement les impacts environnementaux négatifs liés à la culture du maïs, mais, tout comme dans le domaine de l'extraction et du transport du pétrole, celles-ci vont presque toujours à l'encontre des intérêts économiques et sont donc difficilement applicables. Le rapport de l'Allerton Research and Educational Trust⁷⁶ propose une série de mesures visant à réduire les impacts environnementaux des cultures arables. Ces mesures sont classées en deux catégories : les conditions de « cross-compliance » et les options agri-environnementales. Les premières englobent les bonnes pratiques agricoles et seraient une condition d'octroi d'aides. Les agriculteurs s'engageraient à les respecter en signant l'accord IACS (système intégré de gestion et de contrôle relatif aux régimes d'aides communautaires dans le cadre de la politique agricole commune). Les options agri-environnementales sont des pratiques supplémentaires volontaires, qui induisent des coûts supplémentaires pour l'agriculteur, qui bénéficierait toutefois d'une compensation.

Les mesures « cross-compliance » proposées comprennent, outre le respect des législations en vigueur (Directive Nitrates, ...), par exemple, la couverture des sols en hiver, l'aménagement d'une bande enherbée au travers de la pente, l'analyse de la composition du sol en nutriments et un apport mesuré d'engrais, un contrôle régulier des engins agricoles, l'absence de fertilisation en automne, l'utilisation d'équipements adéquats pour l'application d'engrais et de pesticides, l'aménagement de zones tampons le long des rivières, aménagement d'une bande d'un mètre de végétation herbacée en bordure de champ, la protection d'habitats comme les haies, les fossés, les bandes enherbées, les talus, les fourrés, le respect d'une distance maximale de 400 mètres entre habitats non cultivés, l'élaboration d'un plan de gestion (nutriments, pesticides, eau), la limitation des brûlis de chaume (au Portugal), surface minimale en jachère, .

Les options agri-environnementales consistent par exemple en la conversion vers un système d'agriculture organique, la conversion vers des un système herbager, l'aménagement de larges bandes enherbées et d'arbres le long de cours d'eau, la conservation de tournières (utilisation sélective de pesticides et d'engrais), cultures non moissonnées, la plantation et l'entretien de haies, l'aménagement de bandes d'herbe larges de 2 à 6 mètres aux limites des champs, le maintien de murets historiques (Angleterre), la plantation d'arbres, l'élaboration d'un plan de gestion agricole, rotation de cultures (autres que le maïs) sans usage de pesticides ou d'engrais, conversion de cultures arables en forêts, gestion de systèmes arables extensifs, polyculture.

On constate que ces pratiques entrent, dans la plupart des cas, directement en conflit avec la logique même des grandes monocultures, et a fortiori de la culture du maïs. Du fait de la récolte tardive du grain (octobre ou novembre), celle-ci est difficilement compatible avec la

⁷⁶ BOATMAN Nigel, STOATE Christopher, GOOCH Robert, CARVALHO Carlos Rio, BORRALHO Rui, DE SNOO Geert, EDEN Peter (1999), *The Environmental Impact of Arable Crop Production in the European Union: Practical options for Improvement*, Allerton Research and Educational Trust, UK.

mise en place d'une culture couvrante, qui doit se faire entre septembre et octobre⁷⁷. Une fertilisation et une lutte phytosanitaire réduites induisent des risques de pertes de rendement. D'autres obstacles mettent à mal la faisabilité des mesures proposées plus haut, notamment les contraintes de travail, les investissements supplémentaires, la réticence de l'exploitant de passer à un mode d'exploitation tout à fait différent. Un grand nombre de ces obstacles sont également valables pour les autres cultures entrant en ligne de compte pour la production de sucre, comme la betterave ou la pomme de terre.

A propos de bonnes pratiques, le transport des matières premières est une source de préoccupation particulièrement vive dans le cas du pétrole, en raison des risques d'inflammabilité et des risques toxicologiques liés à cette matière. Les dangers d'explosion, de marée noire et de fuites liés aux opérations de transport du pétrole et du gaz naturel, avec les conséquences qu'ils comportent pour la santé et l'environnement, sont absents de l'étape de transport du maïs. De ce point de vue, la biomasse présente un avantage incontestable.

Nous verrons toutefois, dans le paragraphe « émissions dans l'air », que l'étape de transport, dans le système de fabrication du polyacide lactique, peut représenter une source non négligeable de pollution atmosphérique si on étudie l'hypothèse d'une application du système au contexte européen par exemple.

⁷⁷ POUX Xavier (2000), *L'impact environnemental de la culture du maïs dans l'Union Européenne : options pratiques pour l'amélioration des impacts environnementaux*, Paris.

4.2 Consommation d'eau :

	PLA	PLA B/WP	PS
	50 l/kg	< 50 l/kg	175 l/kg
+	Eaux de refroidissement	Eaux de refroidissement	Eaux de procédé
-	Eaux d'irrigation Eaux de procédé	Eaux de procédé	Eaux de refroidissement

Figure 4.2 Consommation d'eau PLA – PLA B/WP - PS

D'un point de vue quantitatif global, le bilan de la consommation d'eau tourne à l'avantage du système de production de polyacide lactique. Celui-ci consomme trois fois moins d'eau que le système de production de polystyrène. Indifféremment de la consommation globale en eau des deux systèmes, il faut, pour en estimer les impacts, en examiner la ventilation entre postes de consommation. En effet, un système qui consomme moins d'eau n'engendre pas nécessairement un moindre impact : si une consommation importante est concentrée dans une région, les impacts peuvent être très importants, comme dans le cas de l'irrigation. La localisation exerce également une influence non négligeable sur la gravité de ces impacts, par exemple de par le relief et les conditions climatiques, comme expliqué précédemment.

De plus, l'eau utilisée pour l'irrigation est en grande partie perdue par évaporation, contrairement à la plupart des procédés industriels, qui restituent une grande partie de l'eau à son milieu (généralement après avoir été traitée si elle est polluée, ou ramenée à une température légèrement supérieure à la température initiale, dans le cas d'eau de refroidissement).

Dans son analyse, Cargill Dow présente les résultats de l'analyse de cycle de vie du polyacide lactique, en matière de consommation d'eau, comme favorables (voir graphique ci-dessous). A l'exception du polyéthylène téréphtalate, tous les autres polymères pétrochimiques dépassent de près ou de loin la consommation en eau du polyacide lactique. La différence est minime pour le polyéthylène et le polypropylène, mais est de l'ordre de plus du triple dans le cas du polystyrène standard, tandis que le nylon bat tous les records avec une consommation en eau quatorze fois plus élevée. En désagréant les résultats par type d'utilisation de l'eau (procédé, refroidissement, irrigation), on remarque cependant que, dans les procédés pétrochimiques, la majeure partie de l'eau prélevée est utilisée comme eau de refroidissement. Cette eau, utilisée généralement dans un circuit secondaire, n'a donc pas été en contact avec les fluides de procédé et sa restitution dans le milieu n'aura vraisemblablement pas d'effet toxicologique ou écotoxicologique. Elle pourrait influencer les débits et la température du cours d'eau, avec des conséquences directes (sensibilité des organismes aux variations de températures) ou indirectes (eutrophisation, synergie avec des substances toxiques) pour l'écosystème aquatique. Cependant, les complexes pétrochimiques sont souvent regroupés dans des aires portuaires, où le trafic de marchandises et les activités industrielles sont intenses. Ce sont donc des zones à faible intérêt écologique.

Dans le cas du polystyrène standard (GPPS), moins de 3% de l'eau consommée sert dans le procédé, soit 5 kg d'eau par kg de PS, ce qui est moins que dans le cas du PLA, qui, d'après le graphique (pas de chiffres cités), voit près de la moitié de sa consommation d'eau utilisée comme eau de procédé, soit environ 25 kg d'eau par kg de PLA. Une grande part du solde sert à l'irrigation, qui est une activité particulièrement dommageable à l'environnement, car il s'agit d'une source diffuse de pollution, qu'il est très difficile à traiter.

La conversion du système de production du polyacide lactique à partir du maïs vers un système basé sur les résidus agricoles comme matière première devrait permettre de pallier au problème que constitue l'irrigation dans l'écobilan du polyacide lactique. La consommation d'eau de procédé de cette alternative sera toutefois encore plus élevée.

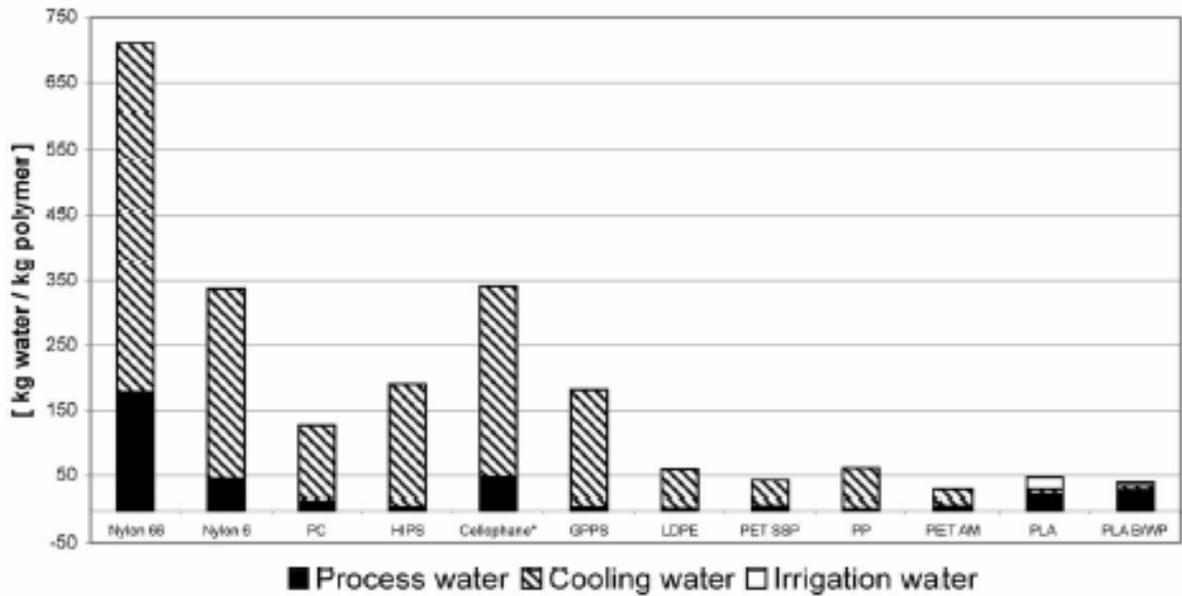


Figure 4.1 Consommation d'eau PLA – PLA B/WP- PS et autres polymères (Cargill Dow)⁷⁸

4.3 Consommation d'énergie fossile :

	PLA	PLA B/WP	PS
cradle to pellet	54,1 MJ/kg	7,4 MJ/kg	86,3 MJ/kg
cradle to cups	pas disponible	786 MJ/1000 gobelets	1149 MJ/1000 gobelets
cradle to landfill	pas disponible	762 MJ/1000 gobelets	1152 MJ/1000 gobelets
cradle to incineration	pas disponible	704 MJ/1000 gobelets	982 MJ/1000 gobelets
cradle to composting	pas disponible	798 MJ/1000 gobelets	-
+	conservation des ressources fossiles	conservation des ressources fossiles	
	sécurité d'approvisionnement énergétique	sécurité d'approvisionnement énergétique	
-			épuisement des ressources fossiles insécurité d'approvisionnement énergétique

Tableau 4.3 Consommation d'énergie fossile PLA – PLA B/WP – PS
« cradle to pellet », « cradle to cup » et « cradle to grave »

Le système de production de polyacide lactique consomme beaucoup moins d'énergie fossile que celui du polystyrène. Si on inclut l'énergie solaire pour considérer la consommation totale d'énergie des deux systèmes, le système « PLA », avec 82,5 MJ/kg, présente encore un bilan énergétique favorable par rapport à celui du PS.

Dans le chiffre du PS est toutefois reprise la consommation d'énergie fossile en tant que matière première (46,2 MJ/kg). Du point de vue de l'efficacité énergétique du procédé, c'est donc le polystyrène qui est gagnant, avec une consommation énergétique de 40MJ/kg par rapport à 54,1 MJ/kg pour le PLA.

Une confrontation avec d'autres plastiques synthétiques confirme généralement cette tendance (HIPS : polystyrène choc, LDPE : polyéthylène basse densité, PET : polyéthylène

⁷⁸ Source : Applications of life cycle assessment to NatureWorks™ polylactide (PLA) production, Erwin T.H. Vinka,*,Karl R. Rábago,David A. Glassner, Patrick R. Gruber

téréphtalate, PP : polypropylène). D'autres plastiques concurrents du PLA pour certaines applications (nylon, polycarbonate, cellophane) ont une consommation énergétique hors matière première même beaucoup plus importante que le PLA.

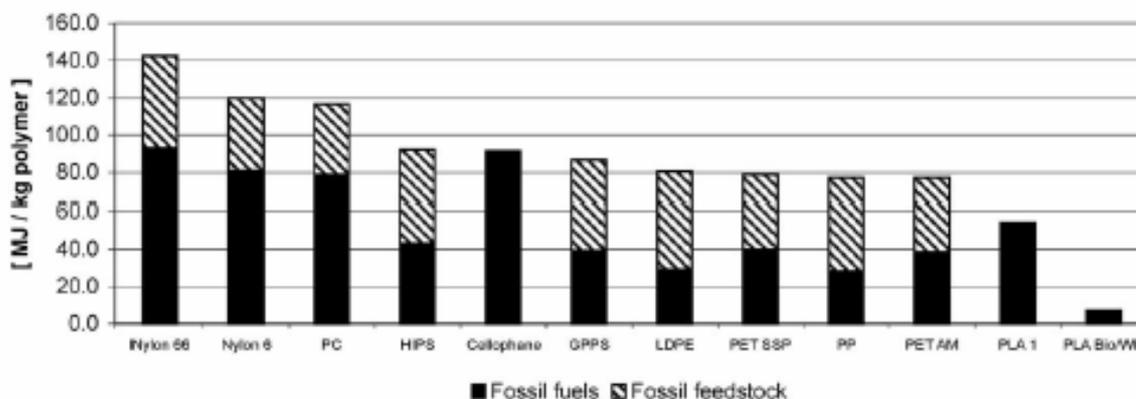


Figure 4.2 Consommation d'énergie fossile PLA – PLA B/WP- GPPS et autres polymères (Cargill Dow)⁷⁹

L'avantage du PLA sur le PS devrait toutefois être moins marqué lorsqu'on tient compte de l'entièreté du cycle de vie, c'est à dire y compris les étapes de transport qui suivent la production des granulés, le compounding et la transformation, la distribution du produit fini et son traitement en fin de vie. Une analyse de cycle de vie réalisée par Cargill Dow pour l'ensemble du cycle de vie de gobelets en polyacide lactique fabriqués par le futur procédé « PLA B/WP » montre un avantage d'à peine une trentaine de pourcents pour le PLA par rapport au PS, dans plusieurs scénarii de fin de vie, alors qu'il était de 91% dans l'ACV « cradle to pellet », ce qui est une indication, si ces deux sources sont cohérentes, que les étapes postérieures à la fabrication de granulés constituent une part importante du bilan énergétique global. Dès lors, on peut se demander, d'une part, si le bilan énergétique global (énergie renouvelable, c'est à dire énergie solaire, éolienne et biomasse) sera encore favorable au « PLA B/WP », et d'autre part, si l'application d'une ACV « cradle to grave » au cas actuel de production de polyacide lactique (fonctionnant au gaz naturel) montrera encore un avantage pour le PLA.

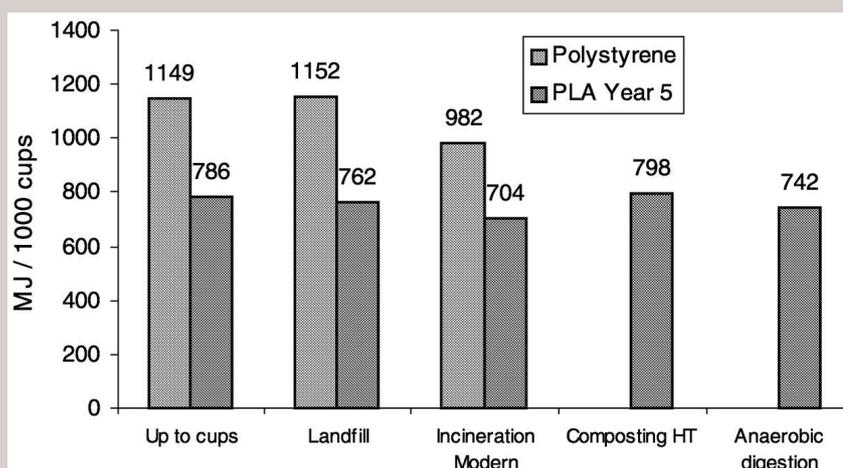


Figure 4.3 Consommation d'énergie fossile PLA B/WP- PS « cradle to grave » (Cargill Dow)⁸⁰

⁷⁹ Ibid.

⁸⁰ GRUBER Patrick R. (2000), "Commodity Polymers from Renewable Resources: Polylactic Acid", in *Carbon Management: Implications for R&D in the Chemical Sciences and Technology: A Workshop Report to the Chemical Sciences Roundtable*, The National Academy of Sciences, pp 166-184.

La conversion à l'utilisation de matières renouvelables comme matière première et éventuellement comme source d'énergie tente de répondre à deux préoccupations ayant trait à l'approvisionnement:

1) l'épuisement des ressources mondiales en énergie fossile :

Les spécialistes prévoient que les réserves mondiales prouvées de pétrole seront épuisées d'ici 40 à 50 ans, au rythme actuel de consommation. La découverte de nouveaux gisements et l'évolution des techniques d'extraction amèneront toutefois à revoir régulièrement ces estimations à la hausse. L'exploration des schistes et des sables bitumeux porterait la durée d'approvisionnement à 100 ans. Les réserves prouvées de gaz naturel, quant à elles, sont estimées à 55 ans.⁸¹

Dans ce contexte, les industries inspirées par une politique de développement durable ont principalement deux moyens de limiter leur consommation d'énergie fossile :

- une amélioration continue de l'efficacité énergétique de leurs procédés ;
- un recours à des sources d'énergie renouvelables.

2) la sécurité d'approvisionnement des pays à faibles ressources en pétrole :

En matière d'approvisionnement en énergies fossiles, les Etats-Unis et l'Europe sont fortement dépendants de l'extérieur, principalement des pays de l'OPEP. En 2000, l'UE dépendait pour son approvisionnement en pétrole, pour 75% de l'extérieur. Les principaux pays dont elle dépend sont par ordre décroissant la Norvège, la Russie, l'Arabie Saoudite, la Libye, l'Iran et l'Irak.⁸² 65% des réserves mondiales de pétrole sont situées au Moyen-Orient.⁸³

Le procédé biologique de Cargill Dow tendra de plus en plus vers une autonomie par rapport aux ressources fossiles, tandis que les procédés pétrochimiques dépendront toujours pour une grande partie de ces ressources, du fait de leur utilisation comme matière première.

A l'échelle multisectorielle, il faut toutefois relativiser, car seuls 4% du pétrole mondial interviennent dans la production des plastiques. En comparaison, 87% sont utilisés par le transport, le chauffage et la production d'énergie. Une réduction de l'exploitation du pétrole doit donc passer surtout par une diminution de la consommation de ces produits pétroliers (diesel, mazout, ...). Par ailleurs, la comparaison des avantages de l'ACV du berceau à la tombe avec ceux de l'ACV du berceau aux granulés montre la faible contribution de l'effort du producteur dans le bilan énergétique global du produit. Dans un contexte politique général de préservation des ressources fossiles et d'indépendance énergétique, il faut donc veiller à garder le sens des priorités.

La réduction du recours aux énergies fossiles dans la fabrication du polyacide lactique devrait être accompagnée d'effets positifs dans un autre domaine : celui des émissions atmosphériques provenant de la combustion et de la volatilisation des hydrocarbures.

⁸¹ WEISSERMEL Klaus., ARPE Hans-Jürgen (2000), *Chimie organique industrielle*, traduction de la 3^e édition anglaise par Philippe Kalck et Brigitte Zahner, De Boeck Université, Paris.

⁸² EUROPEAN COMMISSION (2002), *EU Energy and Transport in Figures – Statistical pocketbook 2002*, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.

⁸³ WORLD RESOURCES INSTITUTE, THE EARTH TRENDS ENVIRONMENTAL INFORMATION PORTAL (2002), *The State of the World's Oil*.

4.4 Emissions de gaz à effet de serre :

	PLA	PLA B/WP	PS
cradle to gate	1,8 kg eq CO ₂ /kg	-1,7 kg eq CO ₂ /kg	2,8 kg eq CO ₂ /kg
cradle to cups	pas disponible	8,1kg CO ₂ /1000 gobelets	27,6 kg CO ₂ /1000 gobelets
cradle to landfill	pas disponible	10,8kg CO ₂ /1000 gobelets	27,8 kg CO ₂ /1000 gobelets
cradle to incineration	pas disponible	16,3kg CO ₂ /1000 gobelets	42 kg CO ₂ /1000 gobelets
cradle to composting	pas disponible	18,4kg CO ₂ /1000 gobelets	-
+	faible contribution à l'effet de serre	très faible contribution à l'effet de serre	
-			contribution à l'effet de serre

Tableau 4.4 Emissions de gaz à effet de serre PLA – PLA B/WP – PS
« cradle to pellet », « cradle to cup » et « cradle to grave »

Une comparaison des systèmes de production de granulés de polyacide lactique et de polystyrène montre qu'ici aussi, le procédé biologique est plus performant que le procédé pétrochimique. Cela s'explique par le fait que :

- le maïs est un puits de carbone tant qu'il n'est pas dégradé, ce qui explique le bilan négatif du système « cradle to pellet » ; le bilan de l'ensemble du cycle de vie « cradle to grave » devient positif, en raison des nombreuses étapes consommatrices d'énergie consécutives à la fabrication des granulés, et de la dégradation du produit en fin de vie ;
- le procédé actuel de Cargill Dow consomme essentiellement du gaz naturel et de l'électricité, alors que la consommation énergétique des procédés pétrochimiques est basée pour une part importante sur le pétrole, qui entraîne des émissions spécifiques de CO₂ plus élevées que le gaz naturel.

La même constatation vaut pour la comparaison du PLA avec d'autres plastiques synthétiques :

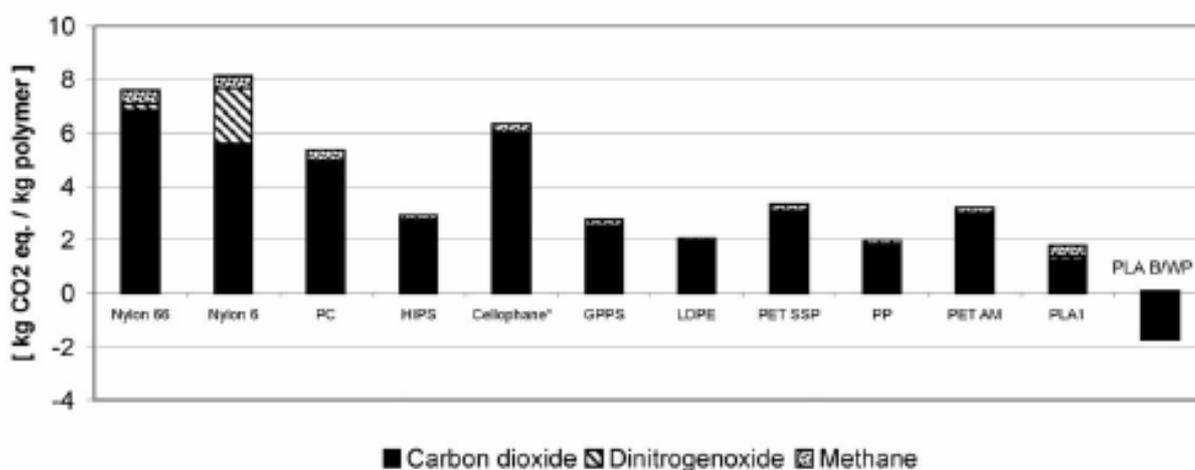


Figure 4.4 Emissions de gaz à effet de serre PLA – PLA B/WP- GPPS et autres polymères (Cargill Dow)

Si on examine les résultats de l'**analyse de cycle de vie** du PLA (scénario théorique PLA B/WP) et du PS **du berceau à la tombe**, le polyacide lactique conserverait un avantage important quelle que soit la filière d'élimination. En effet, le scénario le moins favorable (du point de vue des émissions de GES) pour le PLA, à savoir le compostage, est encore beaucoup plus avantageux (18,4 kg CO₂/1000 gobelets PLA) que le scénario le plus favorable pour le PS, à savoir la mise en décharge (27,8 kg CO₂/1000 gobelets PS). Etant donné l'objectif de minimisation de mise en décharge visée par l'Union européenne et déjà appliquée dans plusieurs pays d'Europe occidentale, et à défaut de filière de recyclage développée pour le polystyrène, la filière à retenir est l'incinération avec récupération de chaleur. Ce scénario affiche un bilan « gaz à effet de serre » de 42 kg de CO₂ pour 1000 gobelets.

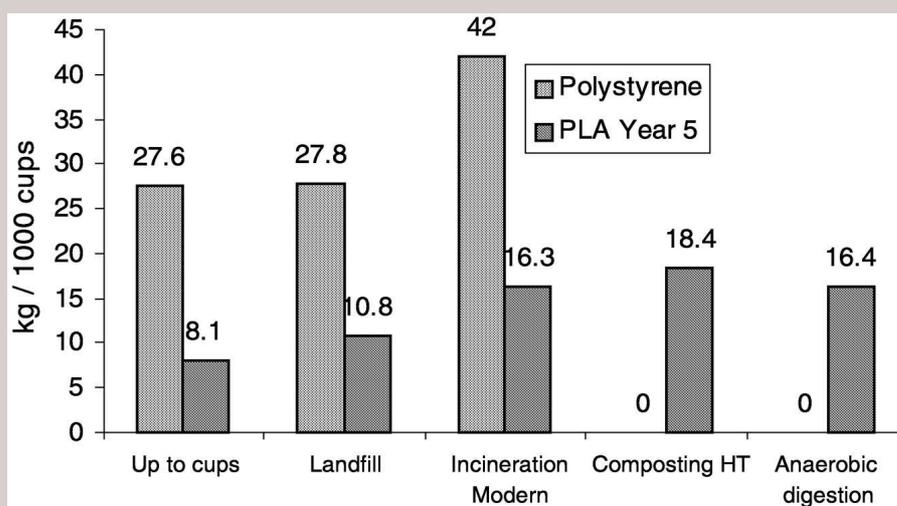


Figure 4.5 Emissions de CO₂ PLA B/WP- PS « cradle to grave » (Cargill Dow)

La performance du système de production de polyacide lactique en matière de gaz à effet de serre est l'argument le plus fort dans la politique de durabilité environnementale affichée par Cargill Dow. La problématique du réchauffement climatique est particulièrement d'actualité et constitue, depuis la signature du protocole de Kyoto en 1997, un des thèmes environnementaux majeurs sur la scène politique internationale. Même si certains scientifiques isolés osent encore mettre en doute la contribution des activités humaines au phénomène de réchauffement climatique, les constats et les prévisions alarmants présentés par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) dans ses rapports incitent à adopter le principe de précaution (voir graphique en [annexe 5](#)).

Les mesures indiquent une hausse de la température moyenne mondiale de l'ordre de 0,6 ± 0,2°C depuis la fin du XIXe siècle, tandis que les émissions de CO₂ sont passées de ± 280 ppm (niveau préindustriel) à 368 ppm en 2000. Les modèles climatiques actuels prévoient un réchauffement de la planète d'environ 1,4 à 5,8°C entre 1990 et 2100⁸⁴.

Les spécialistes du GIEC prévoient, parmi les impacts directs de ce réchauffement:

- la fonte des calottes glaciaires et dilatation thermique des eaux océaniques ; le niveau moyen de la mer aurait monté de 10 à 15 cm en un siècle et les prévisions indiquent une nouvelle hausse de 15 à 95 cm d'ici 2100 ;
- la fonte des glaciers de montagne ;
- des perturbations climatiques : intensification des précipitations (avec risques d'inondations) et des sécheresses (avec risques d'incendies), risque de renforcement des cyclones ;

⁸⁴ GIEC (2001), *Changements climatiques 2001 : Rapport de synthèse, Evaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*, 24-29 septembre 2001, Wembley, UK.

qui pourraient avoir une influence néfaste entre autre sur les récoltes et la sécurité alimentaire, la santé (propagation d'épidémies, augmentation des maladies cardio-vasculaires et respiratoires, risques sanitaires), les écosystèmes côtiers, la biodiversité, les activités économiques des zones côtières, les ressources en eaux.

Ces effets sont toutefois difficiles à prévoir et à évaluer. Les modèles climatiques sortent des résultats dans des fourchettes très larges en raison des nombreuses incertitudes relatives notamment au fonctionnement climatique, à l'influence des nuages et au comportement des océans et des forêts comme puits de carbone. Des scientifiques danois ont également soulevé le rôle des variations de l'activité solaire sur le réchauffement de la Terre.

4.5 Autres émissions atmosphériques :

	PLA	PLA B/WP	PS
+	peu d'émissions liées à la combustion (SO ₂ , CO, NO _x , poussières, métaux lourds, hydrocarbures, ...)	peu d'émissions liées à la combustion (SO ₂ , CO, NO _x , poussières, métaux lourds, hydrocarbures, ...)	
	énergie : électricité & gaz naturel	énergie : éolienne & biomasse	énergie : gazoil & gaz naturel incinération de déchets (boues d'épuration, fonds de cuves...)
-	émissions de procédé : NH ₃ , NO _x et pesticides (agriculture), poussières, COV (& SO ₂)	émissions de procédé : poussières, COV émissions de combustion : dioxines !	émissions liées à la combustion (SO ₂ , CO, NO _x , poussières, métaux lourds, hydrocarbures, ...) & émissions de procédé (idem)

Tableau 4.5 Autres émissions atmosphériques PLA – PLA B/WP - PS

En l'absence de données chiffrées comparatives pour ce compartiment de l'analyse de cycle de vie des deux procédés étudiés, il est difficile de se prononcer en faveur d'un système. Les informations trouvées dans la littérature permettent toutefois de reconnaître un avantage potentiel au bioprocédé par rapport au procédé pétrochimique. Les principales émissions atmosphériques hors gaz à effet de serre, à savoir les oxydes d'azote, les oxydes de soufre, les composés organiques volatils, le monoxyde de carbone, les poussières, les composés métalliques sont fortement liés à la combustion ou à la volatilisation de combustibles fossiles, et a fortiori de pétrole, source énergétique majeure de l'industrie pétrochimique. Le procédé de Cargill Dow, quant à lui, base son approvisionnement énergétique quasi exclusivement sur le gaz naturel, qui émet beaucoup moins de SO_x, de poussières et de métaux. Le bilan en émissions acidifiantes nécessite toutefois une étude approfondie, étant donné que le gaz naturel produit davantage de NO_x que le fuel et que l'agriculture est responsable d'émissions importantes de NH₃, par l'épandage d'engrais sur les immenses superficies des champs nécessaires à l'approvisionnement en maïs. Le projet de procédé « PLA B/WP », basé sur l'utilisation des résidus agricoles et la mise en route d'une éolienne devrait, par contre, présenter un avantage certain en matière d'émissions acidifiantes et eutrophisantes, puisque l'ammoniac émis par les engrais peut être imputés au produit principal de la culture et les NO_x et SO_x émis par la centrale électrique fournissant l'électricité du procédé actuel, seraient évités grâce à la mise en route d'une éolienne. Le bilan « émissions atmosphériques hors GES » de la biométhanisation est beaucoup plus discutable, car la combustion de matières ligneuses est source de dioxines, polluants particulièrement toxiques.

Une réserve supplémentaire doit être émise quant à l'impact pour la santé et la contribution à la formation d'ozone des poussières et des composés organiques volatils émis par le bioprocédé. Ces derniers causent, par ailleurs, une gêne olfactive pour le voisinage.

Enfin, une partie des pesticides sont dispersés dans l'air et présentent des risques pour la santé. Tout comme l'ammoniac, ces émissions peuvent cependant être considérées comme

moindres, voire nulles dans le cas du procédé « PLA B/WP », suivant que le procédé recourt partiellement ou exclusivement aux résidus agricoles comme source d’approvisionnement en sucre. Dans ce dernier cas, l’utilisation des résidus agricoles pourrait être considérée comme une forme de valorisation de déchets, la culture étant destinée à l’origine à d’autres fins (alimentation). Les émissions liées à la culture (NH₃, NO_x, pesticides) pourraient alors être imputées en majeure partie à cette autre utilisation.

Pour combiner les avantages et éviter les inconvénients de chacun des deux scénarii « PLA » et « PLA B/WP », le procédé le plus avantageux du point de vue « émissions dans l’air hors GES » impliquerait le recours à l’éolienne et au gaz naturel comme source d’énergie, et à la biomasse (résidus agricoles) comme matière première (et non comme source d’énergie).

Effets (les effets toxicologiques sont discutés plus loin) :

	PLA	PLA B/WP	PS
+	santé (subst. toxiques limitées)	santé (subst. toxiques très limitées) acidification réduite	
-	acidification ? ozone troposphérique ? effets (éco)toxicologiques des pesticides	ozone troposphérique ? (si biogazéification : dioxines !)	acidification ozone troposphérique santé et écotoxicologie (nombreuses subst. toxiques)

Tableau 4.6 Effets des émissions atmosphériques hors GES : PLA – PLA B/WP - PS

4.6 Emissions dans l’eau

	PLA	PLA B/WP	PS
+	Contamination chimique faible	Contamination chimique faible	
-	DBO élevée pH ? effets toxicologiques des pesticides effets des nitrates	DBO élevée	Augmentation de la T° pH ? Santé et écotoxicologie (nombreuses subst. toxiques)

Tableau 4.7 Emissions dans l’eau PLA – PLA B/WP - PS

La consommation d’eau et les émissions dans l’eau constituent deux des principaux problèmes environnementaux liés à l’industrie agro-alimentaire. La forte concentration en matières organiques des effluents de ces industries nécessite des investissements importants dans le traitement des eaux. Les effluents chargés en matières organiques entraînent des risques élevés d’eutrophisation. Ces effluents ont toutefois l’avantage, par rapport aux effluents de l’industrie pétrochimique, de ne pas contenir de composés toxiques.

L’évolution rapide de la technologie dans le domaine industriel, surtout depuis l’avènement de la biotechnologie, permet d’espérer des améliorations notoires dans la réduction de la pollution des eaux de procédé, par des technologies qui consomment moins d’eau et par des améliorations dans les techniques de traitement des eaux. La même préoccupation environnementale n’est cependant pas présente dans le domaine agricole, où les pollutions par les nitrates et par les pesticides sont, par ailleurs, plus difficiles à réglementer et à contrôler et où les impacts environnementaux sont encore largement pris en charge par la société. Ici aussi, l’utilisation de biomasse agricole comme matière première du procédé permettrait de diminuer la contribution de ce procédé à la pollution par les nitrates et par les pesticides.

4.7 Déchets solides

	PLA	PLA B/WP	PS
+	déchets biodégradables	déchets biodégradables	

-	catalyseurs en étain (dans le produit final ?)	catalyseurs en étain (/biocatalyseurs ?)	déchets toxiques (régénérés, incinérés ou mis en décharge de classe I) déchets inertes (valorisés ou mis en décharge)
---	--	--	--

Tableau 4.8 Déchets solides PLA – PLA B/WP - PS

Les déchets produits par le procédé de production du polyacide lactique (résidus agricoles, terre, boues des stations d'épuration) sont presque exclusivement organiques et biodégradables, ce qui leur permet généralement d'être valorisés dans l'agriculture. L'industrie pétrochimique, par contre, produit de nombreux déchets toxiques qui doivent être éliminés dans une installation d'incinération strictement contrôlée ou mis en décharge spécialisée. Pour des raisons économiques, les autres déchets sont généralement valorisés sur le site-même où il est produit (combustion des hydrocarbures résiduels pour en récupérer l'énergie), ou, plus souvent, par d'autres industries (utilisation des cendres en cimenterie, régénération des catalyseurs).

Les plastiques arrivés en fin de vie se distinguent de la même façon. Le polyacide lactique peut être composté, tandis que le polystyrène est généralement incinéré ou mis en décharge, à défaut d'être recyclé.

La filière du compostage devrait être amenée à se développer dans l'Union européenne, dans le contexte de la minimisation de la mise en décharge.

4.8 Contamination des sols

	PLA	PLA B/WP	PS
+		pas de contamination	
-	pesticides, nitrosamines		hydrocarbures, métaux lourds, ...

Figure 4.9 Contamination des sols PLA – PLA B/WP - PS

La contamination des sols (et indirectement des eaux souterraines) par les deux systèmes est difficile à comparer, étant donné les types et les effets différents des contaminants en jeu. Les sources de contamination sont nettement moins nombreuses dans le système « PLA », où la contamination du sol et des eaux est presque exclusivement liée aux pratiques agricoles (pesticides et engrais). Les boues d'épuration et le compost sont une source potentielle de contamination des sols par les métaux lourds notamment, si les normes de valorisation sont trop laxistes ou/et si le système de compostage est défaillant.

4.9 Toxicologie

	PLA	PLA B/WP	PS
+	très peu de substances toxiques	très peu de substances toxiques	
-	étain, pesticides	dioxines !	nombreuses substances toxiques (toxicité aiguë et chronique) : HAP, métaux lourds, SO ₂ , ...

Tableau 4.10 Toxicologie PLA – PLA B/WP - PS

Le procédé de fabrication du polyacide lactique est un procédé utilisant essentiellement des matières biologiques : plantes comme matière première et enzymes comme catalyseurs, à l'exception du catalyseur en octoate d'étain utilisé dans la polymérisation, mais qui pourrait, à terme, être remplacé par un biocatalyseur également. De ce fait, le procédé de fabrication du PLA en tant que tel a l'avantage par rapport au procédé de fabrication du PS de produire très peu de substances toxiques.

Cet avantage serait confirmé lors de la mise en route de l'éolienne. Le passage du gaz naturel à la biométhanisation, si elle est intéressante du point de vue du bilan CO₂ du procédé et de l'indépendance énergétique de la région, peut cependant poser un risque toxicologique majeur en raison des émissions de dioxines.

La culture influence négativement le bilan toxicologique du système PLA, principalement en raison de l'utilisation des pesticides, qui présentent des risques sérieux pour la santé, même si leurs effets sont mal connus (atteintes au système immunitaire, au système nerveux, dérèglement du système endocrinien, perturbation des fonctions reproductives, risques de cancers). Le procédé recourant aux résidus agricoles en tant que matière première permettrait cependant d'imputer ce poste à l'aliment ou à toute autre application à laquelle cette culture est destinée.

Enfin, il faut être attentif aux étapes finales du cycle de vie du polyacide lactique, à savoir le traitement des déchets, aussi bien du produit en fin de vie que des déchets de production. L'avantage des déchets biodégradables (résidus végétaux et minéraux des cultures, boues d'épuration des effluents, compost) est de pouvoir retourner à la terre, évitant ainsi des problèmes d'encombrement des décharges ou des problèmes de pollution de l'air due à l'incinération. Cet avantage peut toutefois s'avérer être une arme à double tranchant : la valorisation de déchets dans le secteur agricole peut comporter des risques toxicologiques si toutes les précautions ne sont pas prises. L'histoire récente des « poulets à la dioxine » l'a prouvé. La valorisation des déchets de l'industrie pétrochimique dans la fabrication de ciment ne pose pas les mêmes risques. Dans le cas du système PLA, ce sont des aliments qui risquent d'être contaminés. Il faut donc s'assurer que

- des normes suffisamment sévères réglementent la composition des boues et des composts valorisés dans l'agriculture, sachant que ces produits peuvent être épandus régulièrement au même endroit, entraînant un risque de concentration d'éventuels contaminants; la composition des additifs présents dans les articles en polyacide lactique, et la concentration des polymères en étain (en provenance du catalyseur de polymérisation) doivent être étroitement examinées ; dans le doute, le principe de précaution doit être appliqué ;
- ces normes soient respectées.

4.10 Sécurité

	PLA	PLA B/WP	PS
+	peu de risques directs	très peu de risques	
-	inconnue : effets à long terme des OGM production des pesticides	inconnue : effets à long terme des OGM	explosions, marées noires, incendies accidents de travail graves, maladies professionnelles

Tableau 4.11 Sécurité PLA – PLA B/WP - PS

L'industrie de l'acide lactique présente très peu de dangers d'accidents par rapport aux industries pétrolière et pétrochimique. L'exploitation pétrolière et le transport des hydrocarbures sont des activités particulièrement dangereuses, du fait de l'inflammabilité et de la toxicité du produit, mais aussi et surtout des conditions de travail précaires et de l'absence fréquente de bonnes pratiques, dans ce secteur d'activité. Les raffineries et industries pétrochimiques sont couvertes par la directive Seveso.

Une réserve importante doit toutefois être émise : la production des pesticides est une activité à hauts risques. En témoigne l'épisode catastrophique de Seveso, en 1976, qui a donné son nom à la directive. L'explosion d'une fabrique de pesticides a engendré un nuage toxique composé de dioxines, contaminant une région de 15 kilomètres carrés et une population de 37000 personnes.

4.11 Utilisation d'espace

	PLA	PLA B/WP	PS
« extraction »	champs : 47.350 ha pour une production annuelle de 140.000 t	<<	? (probablement <<<)
usine	moulin + installation de LA et de PLA : 6,5 ha	≡	raffinerie + crackeurs + installations d'éthylbenzène, de styrène, de PS + pipelines > 6,5 ha

Tableau 4.12 Occupation d'espace PLA – PLA B/WP - PS

Le besoin d'espace que nécessite la culture de maïs aux fins de production de PLA est un problème majeur qui soulève la question de la disponibilité des terres arables à cette fin. Aux Etats-Unis, le problème ne se pose pas étant donnée l'étendue de la « Corn belt » (ceinture de maïs), cette région immense de plaines au centre de l'Amérique du Nord où est cultivée la majeure partie du maïs américain. En Europe, par contre, le territoire est plus densément peuplé et il est plus difficile de trouver de larges étendues cultivables comparables à celles destinées à approvisionner l'installation de Cargill Dow. D'après les chiffres cités par Galactic (voir chapitre dédié au système de production du polyacide lactique), l'Europe disposerait de suffisamment de terre lorsqu'on additionne toutes les ressources disponibles. En effet, depuis les années 1980, l'Europe a tendance à produire trop de denrées alimentaires. Depuis 1992, l'Union européenne mène une politique de restriction de production de manière à éviter les surplus. Parmi les mesures adoptées à cet effet, l'Union européenne octroie une aide aux agriculteurs lorsque ceux-ci mettent 10% de leurs terres en jachère. Ces terres pourraient donc être utilement exploitées à des fins non alimentaires, et notamment pour l'approvisionnement d'entreprises de production d'acide lactique.

Cependant, ce système d'approvisionnement impliquerait la nécessité pour le producteur de PLA de s'approvisionner auprès de plusieurs fournisseurs afin d'obtenir une quantité suffisante de matière première. Cette option paraît difficilement réalisable. D'un point de vue économique d'abord, cela augmenterait considérablement les coûts de la matière première. D'un point de vue écologique, il faudrait revoir à la hausse la contribution du poste de transport dans l'analyse de cycle de vie du PLA (principalement la consommation d'énergie fossile, les émissions de gaz à effet de serre et les autres émissions atmosphériques). Les champs existants n'étant pas toujours situés le long de voies navigables ou de voies ferrées et le maïs ne pouvant pas être transporté par pipeline (!), le transport routier risquerait d'être le mode de transport le plus utilisé. Or, c'est aussi l'alternative la plus polluante. Contrairement au système de production du polystyrène, qui recourt essentiellement au transport par voie d'eau et par pipelines, le système de production de polyacide lactique pourrait voir son écobilan prendre une tournure très défavorable en raison d'une contribution négative très significative du transport.

Le développement d'un procédé permettant d'utiliser les résidus des cultures pourrait en partie remédier au problème d'espace et d'approvisionnement. Si le procédé tolère des différences de composition de la matière première – ce qui est envisageable étant donné la sélectivité des biocatalyseurs - il pourrait même élargir son spectre d'approvisionnement à différents types de cultures et limiter ainsi les distances par rapport aux fournisseurs. Le coût du transport serait, dans ce cas, compensé par le faible coût de la matière première, et les impacts environnementaux seraient également réduits.

Toutefois, interrogé sur l'emplacement d'une prochaine fabrique de polyacide lactique, Cargill Dow répond que celle-ci se fera très vraisemblablement dans la « Corn belt » (ceinture de maïs) nord-américaine, à l'instar de son installation du Nebraska⁸⁵.

En Europe, le problème de disponibilité de terres produisant les matières premières nécessaires à la production d'acide lactique se posera encore plus à terme, si les autres secteurs de la chimie accroissent leur production dans le domaine de la « chimie verte » (huiles, pigments, additifs alimentaires, produits pharmaceutiques, ...). Les plantations énergétiques sont un autre concurrent d'espace très probable à long terme, étant donné l'objectif que s'est fixé la Commission européenne de remplacer, d'ici 2020, 20% des carburants pour véhicules par des carburants de substitution, ceci dans le but de réduire la dépendance de l'UE vis-à-vis du pétrole tout en contribuant au développement durable. La Commission vise par là tant les biocarburants (bioéthanol et biodiesel) que l'hydrogène et les piles à combustible.

4.12 Paysage

L'aspect paysager est un paramètre plutôt subjectif si on juge le caractère attrayant ou destructeur du paysage. Malgré l'objectivité vers laquelle tend ce document, je me dois toutefois de prendre cet élément essentiel de l'environnement en compte dans ma discussion.

La première question qui se pose est : quelles transformations du paysage la mise en place du système de production implique-t-elle ?

La production de polyacide lactique implique de larges étendues de cultures. Si la nouvelle culture se substitue à une ancienne culture ou à des herbages, les impacts paysagers sont à comparer avec l'ancienne affectation des terres. Dans la culture du maïs, il faut savoir que les terres sont laissées à nu pendant plusieurs mois de l'année et que la logique de la monoculture tend vers une simplification et une uniformisation du paysage, ce qui contraste avec les systèmes herbagers ou avec les cultures qui permettent la couverture des sols en hiver ou la polyculture. À défaut de pouvoir se substituer à d'anciennes cultures, la culture aux fins de production de polyacide lactique aura en général tendance à se substituer à des espaces naturels, ce qui peut être très négatif sous un aspect paysager mais aussi du point de vue de la biodiversité.

En parallèle, l'exploitation pétrolière (et l'exploitation minière) est généralement une activité destructrice pour les paysages lorsqu'elle a lieu on shore. Elle est cependant plus limitée dans l'espace et a lieu dans des endroits peu fréquentés. La gêne visuelle peut être discutable en fonction du site d'extraction. Pour la même raison, l'exploitation off-shore ne présente pas de problème paysager.

Les sites de production des deux systèmes sont assez comparables d'aspect. Seule la situation géographique peut avoir une influence sur le paysage : les raffineries de pétrole et les complexes pétrochimiques sont généralement localisés dans des ports ou le long de canaux, concentrant l'éventuelle gêne visuelle géographiquement. L'installation de Cargill Dow, par contre, est située en plein milieu de champs.

4.13 Biodiversité

Ce paramètre est également difficile à évaluer du fait de la confrontation d'effets directs et d'effets indirects des activités sur la biodiversité.

La monoculture extensive a un impact négatif direct sur la biodiversité végétale sur une large étendue, et également sur la faune. Les impacts indirects sont liés aux pressions environnementales induites par les exigences de ce type de culture : consommation d'eau d'irrigation, empoisonnement par les pesticides, eutrophisation.

⁸⁵ Communication personnelle d'Erwin Vinck, Cargill Dow, le 23 avril 2003.

L'exploitation pétrolière (et l'exploitation minière) a également des effets directs sur la biodiversité lorsqu'elle nécessite la déforestation ou la destruction de tout autre écosystème. Mais ses effets sont surtout indirects, par la contamination des eaux par les hydrocarbures lors de marées noires ou de fuites de pipelines.

Les effets des activités de production sur la biodiversité sont très difficiles à évaluer. Le procédé de production de polyacide lactique engendre probablement davantage de risques d'eutrophisation en raison de la charge élevée des effluents en matières organiques. Elle peut également perturber les écosystèmes via l'influence des activités sur le débit du cours d'eau. Le procédé de production de polystyrène peut également augmenter la demande biochimique en oxygène, mais aussi augmenter la température de l'eau et contaminer l'eau avec des substances toxiques. On peut toutefois s'attendre à ce que les effets soient plus diffus dans le cas du système de production de polystyrène étant donné la situation des raffineries et des sites pétrochimiques à proximité de la mer. A l'inverse, l'installation de polyacide lactique est située à l'intérieur des terres, à proximité d'une rivière. L'impact environnemental des rejets risque d'en être renforcé.

4.14 Synthèse:

	Polyacide lactique		Polystyrène
	PLA	PLA "B/WP"	
Consom. matières 1ères non renouvelables	++	++	--
Consommation d'eau	--	-	--
Consommation d'énergie fossile	+	++	--
Emissions de GES	+	++	--
Pollution atmosphérique	-	+	--
Emissions dans l'eau	-	-	-
Déchets solides	(+)	(+)	-
Contamination des sols	-	+	-
Toxicologie	-	(+)	-
Sécurité	+	+	--
Paysages	-	+	(-)
Utilisation d'espace	--	+	+
Biodiversité	-	+	-

Tableau 4.13 Synthèse des analyses de cycle de vie PLA – PLA B/WP - PS

PLA : procédé actuel, basé sur le maïs

PLA « B/WP » : procédé prévu d'ici 5 à 8 ans, basé sur l'utilisation de biomasse végétale et recourant à l'énergie éolienne et à la gazéification

() : sous réserve :

- déchets solides : + s'ils peuvent être valorisés
- toxicologie : + si le procédé n'a pas recours à la biogazéification ou si les émissions de dioxines sont bien contrôlées
- paysages : (-) pour le PS, si le pétrole est extrait on-shore

CONCLUSIONS

1. BILAN ENVIRONNEMENTAL

En conclusion de cette analyse de cycle de vie conceptuelle du système de production de polyacide lactique, on peut identifier trois paramètres pour lesquels ce système présente un **avantage** incontestable par rapport au système de production du polystyrène : la **consommation de matières non renouvelables**, la **consommation d'énergie fossile** et les **émissions de gaz à effet de serre**.

Dans les autres domaines étudiés, bien que le procédé de production en lui-même soit plus propre et plus sûr (beaucoup moins de substances toxiques et/ou explosives) que les procédés pétrochimiques, les avantages sont beaucoup plus discutables lorsqu'on étudie le système de production dans sa globalité, en raison des **impacts néfastes directs et indirects des activités agricoles**. Ceux-ci sont loin d'être négligeables étant donné la superficie des cultures nécessaires à l'approvisionnement du système. L'agriculture n'épargne aucun compartiment : l'air (émissions d'ammoniac, responsables de l'acidification et de l'eutrophisation), l'eau (eutrophisation, contamination par les pesticides, influence des débits et épuisement des ressources en eau), le sol (contamination par les pesticides, destruction et appauvrissement des sols), les êtres vivants (appauvrissement de la biodiversité, écotoxicité des pesticides) et l'homme en particulier (effets toxicologiques des pesticides). Si on élargit le champ d'étude du système de production du polyacide lactique à la fabrication des pesticides et des engrais utilisés par la culture, le bilan peut s'avérer encore plus défavorable. Si ces étapes parallèles n'ont peut-être qu'un faible impact sur les bilans « consommation d'énergie » et « émissions de gaz à effet de serre », les risques toxicologiques liés à ces activités sont d'une toute autre échelle, une explosion ou une fuite pouvant entraîner des effets aigus sur la santé.

Il est donc particulièrement important d'avoir une vue élargie du système, les **activités et les substances auxiliaires** pouvant avoir des impacts plus importants que les activités principales et les matières premières. Dans cette même optique, la valorisation des déchets (boues d'épuration des eaux, compost) dans l'agriculture mérite une attention particulière, car si la biodégradabilité de ces substances permet d'éviter le problème d'entreposage des déchets, elle peut indirectement être source d'autres problèmes – moins bien cernés et donc plus pervers – si toutes les précautions ne sont pas prises. Une contamination des ressources agricoles par des métaux lourds ou des composés organiques persistants par exemple n'est sûrement pas à exclure, avec les effets néfastes que celle-ci entraînerait sur la santé. Les normes réglementant la composition des boues d'épuration valorisables et des produits en polyacide lactique compostables doivent donc être particulièrement strictes et les systèmes de compostages bien surveillés.

Il est également indispensable de **rester attentif à l'ensemble des impacts environnementaux et au contexte de l'exploitation**, pour éviter d'aboutir à des conclusions biaisées, comme c'est généralement le cas des analyses de cycle de vie publiées par les producteurs de bioplastiques. En l'occurrence – et l'analyse de cycle de vie publiée par Cargill Dow l'atteste -, elles se limitent systématiquement à deux ou trois critères environnementaux, à savoir la consommation d'énergie fossile, les émissions de gaz à effet de serre et, exceptionnellement, la consommation en eau, pour démontrer la durabilité environnementale du procédé biotechnologique. Or, le concept de durabilité ne peut se limiter aux seules préoccupations d'approvisionnement en matières premières et de maintien de l'équilibre climatique. Si la lutte contre le changement climatique, qui a succédé à la problématique des pluies acides et à l'amincissement de la couche d'ozone dans le répertoire des problématiques environnementales embrassées par l'ONU, est actuellement très médiatisée, elle ne peut pas nous faire oublier les effets plus directs et plus tangibles des contaminations chimiques de l'environnement. La durabilité environnementale passe également par la maîtrise des risques. Sont concernées au premier chef : les pratiques

agricoles et le recours au génie génétique, en raison du peu de connaissances et de recul dont disposent les scientifiques face à l'évolution rapide des substances développées. Des recherches doivent donc se poursuivre pour mieux cerner les risques qui pourraient accompagner ces pratiques. A défaut de certitude scientifique, le principe de précaution doit être appliqué.

Si un système de production n'est pas meilleur qu'un autre sur tous les critères, il se pose automatiquement une question fondamentale : celle de **l'établissement des priorités**. La pondération des critères dans une analyse de cycle de vie n'est jamais neutre. La définition des priorités environnementales au niveau de l'entreprise peut être motivée par des considérations politiques (l'entreprise accorde plus d'importance à l'un ou l'autre aspect), économiques (conformité aux réglementations, limitation des taxes, ...) ou de marketing (image de marque). Ce choix ne peut toutefois pas faire oublier les autres critères et ne peut surtout pas conduire à une confusion entre les moyens et les objectifs. En l'occurrence, dans le cas des bioplastiques, et notamment du polyacide lactique, un recours massif aux ressources renouvelables aux dépens des ressources fossiles, peut avoir un effet contraire à l'objectif général de durabilité environnementale dans lequel la démarche s'inscrit. Les contaminations par les pesticides (activités agricoles), les dioxines (combustion de matière ligneuse), les métaux lourds (valorisation de boues ou de composts contaminés) représentent des dangers toxicologiques tout aussi graves que ceux liés à l'utilisation d'hydrocarbures, si ces premiers ne sont pas étroitement contrôlés.

Moyennant ces précautions générales, on peut estimer que l'option encore théorique, basée sur **l'utilisation de biomasse comme matière première** et recourant à l'éolienne, en écartant cependant le passage du gaz naturel à la biogazéification, présente des perspectives très intéressantes d'un point de vue environnemental. Elle combine les avantages du procédé actuel à la réduction ou la suppression des inconvénients directement liés à l'agriculture, à savoir : la consommation d'eau aux fins d'irrigation, la pollution atmosphérique par les émissions d'ammoniac, la contamination de l'air, de l'eau, du sol par les pesticides, les effets toxicologiques, la dénaturation des paysages, l'occupation d'espace, l'appauvrissement de la biodiversité.

Cet avantage n'est toutefois effectif que si cette matière première est facilement accessible et disponible en quantité suffisante et si son utilisation par le procédé de production de polyacide lactique peut être considérée comme une forme de valorisation, c'est-à-dire si l'utilisation de cette biomasse ne se substitue pas à une autre forme d'utilisation (fourrage, par exemple), auquel cas il faut tenir compte des impacts d'un passage à une nouvelle source d'approvisionnement pour l'ancienne application (par exemple nourriture industrielle).

2. APPLICATION AU CONTEXTE EUROPEEN

Aux USA, le développement d'industries de plastiques recourant au maïs comme matière première est réaliste, compte tenu de l'abondance et de l'accessibilité de ces ressources. Dans un contexte européen, par contre, seul le système basé sur la valorisation-matière de la biomasse est concevable. Contrairement aux Etats-Unis, qui disposent d'immenses espaces disponibles pour la culture, l'Europe est limitée en étendues arables. Le système actuel de Cargill Dow, avec ses 47.350 ha, est difficilement transposable au niveau européen. Les surfaces cultivées en maïs couvraient 7.174.000 ha en Europe des 15 en 1996. Une usine de production de la taille de Cargill Dow nécessiterait donc approximativement 0,6% des cultures européennes. Cela peut paraître peu, mais c'est sans compter sur un grand nombre de facteurs limitants:

- la dispersion des cultures : en Europe, l'approvisionnement d'une usine d'une capacité annuelle de 140.000 tonnes nécessiterait différents fournisseurs et donc davantage de trajets, ce qui constitue autant un obstacle économique qu'environnemental ;

- les économies d'échelle : dans l'état actuel de la technique, une telle capacité de production (140.000 tonnes par an) est nécessaire pour que le procédé soit économiquement viable ;
- la compétition avec d'autres applications : dans le cadre de la politique agricole de l'Europe, une part croissante des cultures sera vraisemblablement amenée à être utilisée à des fins non alimentaires, en conséquence des quotas imposés sur certains aliments, dont le sucre, et l'encouragement financier au gel des terres, y compris à celles couvertes par des cultures énergétiques. La chimie verte se développe, mais également les cultures énergétiques, aux fins de production d'énergie verte ou de transformation en biocarburants (biodiesel, bio-éthanol) sont amenées à se développer pour aider à rencontrer l'objectif de l'UE de 20% de carburants alternatifs d'ici 2020.

L'utilisation de biomasse peut limiter certaines de ces difficultés, notamment en limitant les déplacements entre les champs et les installations de production tout en fournissant une matière première meilleur marché. Cependant, elle risque d'entrer en conflit avec d'autres applications de la biomasse, en premier lieu le fourrage pour le bétail.

La fabrication de polyacide lactique en Europe, à grande échelle, est donc très peu probable. Au mieux, s'il devient économiquement plus intéressant d'ici quelques années, il pourra y être appliqué à plus petite échelle. L'intérêt économique et la faisabilité du système dépendront notamment de :

- la performance du produit fini :

D'après les producteurs et la littérature scientifique, le polyacide lactique présente des caractéristiques très prometteuses, en raison notamment des multiples possibilités de combinaison qu'offrent ses isomères optiques. L'innovation est un facteur important de percée d'un produit sur le marché.

- la demande du marché :

Celle-ci dépend de l'attitude et du comportement des consommateurs vis-à-vis de ces produits et du cadre de compostage mis en place par les autorités

- le coût de la matière première :

L'évolution du coût de la matière première peut également jouer en faveur du polyacide lactique, le prix du pétrole étant voué à grimper au fur et à mesure que les réserves s'épuisent. Par ailleurs, il serait intéressant de comparer les prix des matières premières dans l'hypothèse de l'établissement d'un coût-vérité pour le pétrole et pour le maïs. L'exploitation et le transport pétroliers ne connaissant ou ne respectant que peu de normes de sécurité et d'environnement, le prix actuel du pétrole ne reflète pas son coût réel. Idéalement, pour comparer des choses comparables, il faudrait pouvoir tenir compte des coûts sociaux et écologiques, c'est à dire les coûts des mesures visant à éviter la pollution (à la hauteur des normes européennes : étude d'incidence préalablement à l'exploitation d'un gisement, respect de la qualité de vie des populations locales, respect des normes de sécurité sur les sites de forage, entretien régulier et remplacement à temps des canalisations, entretien des pétroliers, utilisation de pétroliers à double coque,...) et les coûts de réparation des dommages (cotisation au Fonds international d'indemnisation pour les dommages dus à la pollution par les hydrocarbures FIPOL, coûts de vies humaines perdues, coûts de soin de santé, coûts des pertes économiques non remboursées par le FIPOL). Les mesures de prévention de la pollution sont toutefois difficiles à mettre en œuvre en raison de la difficulté et des coûts des contrôles et des risques de distorsion de la concurrence.

- la sécurité d'approvisionnement :

La fragilité des cultures, leur sensibilité aux ravageurs, aux maladies, aux incendies et aux aléas climatiques (sécheresse, tempêtes, inondations), peuvent constituer un frein majeur. Pour la plupart des cultures, cette insécurité est renforcée par le fait que la récolte ne se

fait qu'une fois par an, à la même période. En cas de ravage des récoltes, le producteur se verrait dans l'obligation de chercher une source d'approvisionnement beaucoup plus éloignée ou serait même conduit à fermer son usine. La limitation de la fréquence d'approvisionnement dans le temps soulève également la question du stockage de la matière première.

- l'évolution de la technique :

Le procédé de production de polyacide lactique développé par Cargill Dow est très récent et des découvertes importantes dans le domaine de la biotechnologie ont déjà eu lieu depuis et sont attendues dans les années à venir. On attend notamment des percées dans la recherche de nouvelles bactéries. Les spécialistes estiment à moins d'1% le nombre des micro-organismes de la nature qui ont été cultivés. Une biodiversité énorme serait donc encore inexplorée, laissant présager un potentiel catalytique non négligeable. Des découvertes importantes sont également attendues dans le domaine du génie génétique. Les risques éventuels que pourrait présenter l'utilisation de ces nouveaux organismes devront cependant être étudiés et le cadre législatif du pays continuera à jouer un rôle important dans le développement industriel de ces technologies.

Le domaine de la biotechnologie industrielle aux fins de réduire les impacts environnementaux des procédés fait partie des domaines prioritaires du programme de recherche européen. Dans une étude, Mc Kinsey prédit que, d'ici 2010, la biotechnologie aura envahi 10 à 15% du marché des polymères, par rapport à moins d'1% aujourd'hui.⁸⁶

- incitants externes :

Cargill Dow reconnaît que l'apport d'aides de l'Etat a joué un rôle incontournable dans le développement de son projet. Par ailleurs, les subsides octroyés par l'Etat aux producteurs d'électricité verte permet aux entreprises d'envisager l'installation d'éoliennes ou le recours à d'autres formes d'énergie renouvelable.

Les procédés biotechnologiques pourraient aussi être encouragés indirectement, par effet de découragement des activités industrielles plus polluantes, qui doivent faire face à des contraintes administratives et fiscales de plus en plus complexes, tant en matière de déchets que de consommation d'énergie (force motrice), de prélèvements en eaux, de rejets dans l'eau, d'émissions atmosphériques, de sécurité et de bruit. A titre illustratif, les coûts liés au respect des engagements du protocole de Göteborg⁸⁷ réglementant les émissions de substances acidifiantes, ont été estimés par la Commission européenne à 58.433 millions EUR/an⁸⁸, la plus grande part des dépenses étant attendues de l'industrie. L'Union européenne a édicté une série de normes à l'attention des sources fixes. Ainsi, la directive de 2001 relative à la limitation des émissions de certains polluants dans l'atmosphère en provenance de grandes installations de combustion impose des nouvelles valeurs limites plus contraignantes que la précédente directive (de 1988) pour les émissions de SO₂, NO_x et de poussières des installations de combustions de plus de 50 MW. Les grands complexes pétrochimiques sont directement visés par cette directive. En outre, pour un certain nombre d'activités industrielles, la législation européenne impose, via le permis d'environnement, le recours aux meilleures technologies disponibles.

- un partenariat solide :

⁸⁶ cité par CARREZ Dirk (Fedichem), "The use of renewable feedstock in chemical production – biomass", Presentation at *Sustech 12 Event*, 18-19 June 2002, Cefic

⁸⁷ Le Protocole de Göteborg du 1^{er} décembre 1999 de la Commission économique pour l'Europe des Nations Unies (ONU-CEE) sur la pollution atmosphérique transfrontalière à longue distance, en vue de réduire les phénomènes d'acidification, d'eutrophisation et de formation d'ozone troposphérique, réglemente essentiellement les émissions de SO_x, NO_x, COV et NH₃.

⁸⁸ INTERNATIONAL INSTITUTE FOR APPLIED SYSTEMS ANALYSIS (IIASA) *Economic Evaluation of a Directive on National Emission Ceilings for Certain Atmospheric Pollutants*, European Commission, DG Environment, November 1999.

La joint venture Cargill Dow a permis de profiter de l'expérience des deux firmes dans les domaines respectifs des produits agricoles et des plastiques.

3. CONCLUSION GENERALE

Moyennant le rassemblement des conditions environnementales et économiques développées plus haut et la résolution du problème d'insécurité d'approvisionnement, la production de plastiques en polyacide lactique à partir de biomasse peut s'inscrire dans le cadre du développement durable. Dans l'état actuel des techniques, cette contribution reste toutefois du domaine potentiel et doit être accompagnée de nombreuses réserves, notamment quant à la disponibilité et l'accessibilité des résidus agricoles, l'innocuité de la valorisation des déchets dans l'agriculture, l'innocuité des organismes génétiquement modifiés.

Pour que les avantages liés à la biodégradabilité du polyacide lactique soient mis à profit, le système nécessite en outre le développement de systèmes de compostage et une bonne information du public, sans quoi la biodégradabilité du produit pourrait avoir des effets pervers, par exemple à travers un comportement laxiste qui se traduirait par une surconsommation des plastiques, une augmentation des déchets plastiques abandonnés dans l'environnement, ou des problèmes de tri.

En raison des superficies de cultures nécessitées pour la production du polyacide lactique, il est difficilement concevable que celui-ci puisse occuper une part significative du marché des plastiques, même s'il est amené à être concurrentiel. D'un point de vue environnemental, il serait donc judicieux de réserver ce plastique à des applications où la biodégradabilité du produit fini est réellement intéressante, comme des films agricoles, des pots de fleurs, des emballages alimentaires ou des services jetables.

Pour les autres applications, les impacts liés à l'exploitation pétrolière, l'épuisement des ressources fossiles et les émissions de gaz à effet de serre ne sont pas des arguments suffisamment lourds pour bannir les plastiques issus du pétrole. En effet, l'industrie des plastiques consomme à peine 4% de l'ensemble des ressources pétrolières exploitées, la majeure partie étant utilisée par les transports et le chauffage. Les impacts de l'exploitation du pétrole doivent donc être répartis en conséquence. Plutôt que de vouloir limiter les pollutions liées à l'utilisation du pétrole en s'attaquant à la production des plastiques, il est donc plus judicieux, à un niveau politique général, de s'adresser en priorité aux produits principaux du pétrole, à savoir les carburants pour véhicules et le mazout de chauffage, en cherchant des alternatives plus propres et plus durables à ces combustibles et en encourageant une utilisation plus rationnelle de l'énergie. L'encouragement du recyclage des plastiques est également une piste à exploiter, pour autant qu'il permette des économies de matière première tout en n'engendrant pas de pollution supplémentaire.

En outre, il est intéressant de signaler que la production de naphta n'est pas le but premier des raffineries. Il doit être considéré comme un coproduit de l'essence et du mazout notamment, et son utilisation dans l'industrie chimique pourrait même être considérée comme une forme de valorisation, au même titre que l'on considère aujourd'hui l'utilisation de résidus agricoles aux fins de produire du polyacide lactique comme une forme de valorisation. Ces considérations doivent mener à adopter une position plus modérée vis-à-vis de la part de responsabilité des systèmes de production de plastiques quant aux impacts environnementaux liés à l'exploitation du pétrole et du gaz naturel

La biotechnologie n'en reste pas moins une technologie qui laisse entrevoir de nombreuses possibilités, tant du point de vue du développement de nouveaux produits que sous un angle environnemental. Ce travail l'a montré à plusieurs reprises. Il montre toutefois aussi les limites physiques et environnementales de la biotechnologie, lorsque celle-ci aborde l'utilisation de matières agricoles dans un secteur de production de masse comme c'est le cas des polymères plastiques. L'intérêt de la biotechnologie dans l'industrie chimique se limitera donc principalement à l'application des biocatalyseurs et à l'utilisation de ressources renouvelables dans des productions de faibles volumes et dans des marchés à créneaux.

Les performances environnementales des biocatalyseurs devraient être plus faciles à définir, car leurs contributions se vérifient au niveau de la consommation d'énergie, d'eau et au niveau des émissions du procédé-même, tandis que le recours à la biomasse agricole nécessite la prise en compte des impacts liés à la culture, ce qui complique l'étude des performances environnementales.

Une étude réalisée par Mc Kinsey prévoit une croissance de la pénétration des marchés par la biotechnologie dans différents secteurs chimiques d'ici 2010 à : 60% pour la chimie fine (essentiellement des produits pharmaceutiques), 10 à 15 % pour les polymères (PLA et 3GT), 10 à 15 % pour la chimie de masse (éthanol, acides adipiques, acrylamide) et 0 à 50% pour les spécialités (détergents, lubrifiants, parfums). Les principaux progrès sont donc attendus dans le domaine pharmaceutique, où la biotechnologie a déjà une entrée dans 15% et où les biocatalyseurs ont déjà démontré leur efficacité environnementale et économique.

*

*

*

BIBLIOGRAPHIE

COMMISSION AMPERE (2000), *Rapport de la Commission pour l'Analyse des Modes de Production de l'Electricité et le Redéploiement des Energies (AMPERE) au Secrétaire d'Etat à l'Energie et au Développement durable – Rapport principal*, Sectie F. Hernieuwbare en alternatieve energieën, octobre 2000.

APME, <http://www.apme.org>.

BAKER John (2001), "A natural contender", in *European Chemical News*, 17-23 September 2001.

BASF Antwerpen N.V. (2003), *Responsible Care-rapport 2002*.

BELSON Ken (2002), "Using Corn-Based Plastic, A Laptop Starts to Go Green", in *The New York Times*, 18 July 2002.

BIDLINGMAIER Werner (Prof. Dr.), JAKOBI Anja, KAEB Harald (Dr.), KLAUSS Mathias, LICHTL Martin (2003), "Kassel Project", Berlin, February 2003.

Bio-wise (October 2000), "Building confidence to realise the benefits of biotechnology".

Bio-wise (October 2002), "Biotechnology Applications in the Chemical Industry".

BOATMAN Nigel, STOATE Christopher, GOOCH Robert, CARVALHO Carlos Rio, BORRALHO Rui, DE SNOO Geert, EDEN Peter (1999), *The Environmental Impact of Arable Crop Production in the European Union: Practical options for Improvement*, a report prepared for DG XI of the European Commission, Study contract B4-3040/98/000703/MAR/D1, Allerton Research and Educational Trust, UK.

BOUSTEAD I. (1997), *Eco-profiles of the European plastics industry – Report 4: polystyrene*, The Association of Plastics Manufacturers in Europe (APME), Brussels.

BOUSTEAD I. (1999), *Eco-profiles of plastics and related intermediates – Methodology*, APME.

CARREZ Dirk (Fedichem), "The use of renewable feedstock in chemical production – biomass", Presentation at *Sustech 12 Event*, 18-19 June 2002, Cefic.

CLARINVAL A.-M., MONFORT-WINDELS F. (2003), *Les polymères biodégradables*, CRIF, Seraing.

COMMISSION EUROPEENNE (2001), *Livre vert: Vers une stratégie européenne de sécurité d'approvisionnement énergétique*, COM(2000) 769 final, Office des publications officielles des Communautés européennes, Luxembourg.

CORE Jim (2002), "New Starch Removal Process Could Change Corn Wet Milling", in ARS News and Information, <http://www.ars.usda.gov/is/pr/2002/020221.htm>.

CORN REFINERS ASSOCIATION (1999), "The process (step-by-step)", <http://www.corn.org>.

CORN REFINERS ASSOCIATION (Dec. 2002), "Tapping the Treasure", <http://www.corn.org>.

DIAMANTIDIS Nick D., KOUKIOS Emmanuel G. (2000), "Agricultural crops and residues as feedstocks for non-food products in Western Europe", in *Industrial Crops and Products*, 11 (2000), pp. 97-106, Elsevier Science.

DINGER Françoise, AUBRY Frédéric, WIART Jacques (1999), *Utilisation des déchets organiques en végétalisation*, ADEME : Cemagref, Paris.

DOBACZYNSKI Alexandre, PIPERAUD Michel, TROTIGNON Jean-Pierre, VERDU Jacques. (1982), *Les matières plastiques – structures, propriétés, mise en œuvre, normes*, CEP Edition, Paris.

ENVIRONMENT AND PLASTICS INDUSTRY COUNCIL (2000), « Biodegradable Polymers : A Review », Nov. 2000.

ENVIRONMENT AND PLASTICS INDUSTRY COUNCIL (2001), „Une nouvelle vague de plastiques biodégradables s’empare des marchés à créneaux“, Edition spéciale *Nouvelles et Idées*, mai 2001.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (1995), “National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants : Petroleum Refineries”, in *Federal Register*, Vol. 60, No. 160, 18 August 1995.

EPSTEIN Paul R. and SELBER Jesse (2002), *Oil: A life cycle analysis of its health and environmental impacts*, The Center for Health and the Global Environment, Harvard Medical School, Boston.

EUROPEAN COMMISSION (2002), *EU Energy and Transport in Figures – Statistical pocketbook 2002*, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.

FÉDÉRATION DES INDUSTRIES CHIMIQUES DE BELGIQUE (Fedichem) (2003), *Le Responsable Care dans la pratique – Indicateurs de performances V*, Bruxelles.

FÉDÉRATION PÉTROLIÈRE BELGE (2002), *Rapport Annuel 2002*.

FOST Plus (2001), *Rapport annuel 2000*, avril 2001.

GALACTIC LABORATORIES, “Biopolymers as viable alternatives to common plastics materials (with special emphasis on PLA used for packaging applications)”, <http://www.lactic.com>.

GIEC (2001), *Changements climatiques 2001 : Rapport de synthèse, Evaluation du Groupe d’experts intergouvernemental sur l’évolution du climat*, 24-29 septembre 2001, Wembley, UK.

GRUBER Patrick R. (2000), “Commodity Polymers from Renewable Resources: Polylactic Acid”, in *Carbon Management: Implications for R&D in the Chemical Sciences and Technology: A Workshop Report to the Chemical Sciences Roundtable*, The National Academy of Sciences, pp 166-184, <http://www.nap.edu/openbook/0309075734/html/166.html>.

GRUBER Patrick, O’BRIEN Micheal (2002), “Polylactides ‘NatureWorks™ PLA’”, in: DOI Y., STEINBÜCHEL A. , editors (2002), *Biopolymers*, Vol. 4, polyesters III applications and commercialisation products, Weinheim: Wiley-VCH, pp. 235-249.

GUGLIELMO Raymond (1966), *La pétrochimie dans le monde*, 2^e édition, Presses Universitaires de France, Paris.

INCHEM, base de donnée préparée en coopération entre l’International Programme on Chemical Safety et la Commission européenne, IPCS, CEC 2001, <http://www.inchem.org>.

INSTITUT NATIONAL DE STATISTIQUES (INS), SPF Economie, PME, Classes moyennes et Energie, <http://www.statbel.fgov.be>.

INTERNATIONAL INSTITUTE FOR APPLIED SYSTEMS ANALYSIS (IIASA) *Economic Evaluation of a Directive on National Emission Ceilings for Certain Atmospheric Pollutants*, European Commission, DG Environment, November 1999.

IPPC (February 2003), *Draft Reference Document on Best Available Techniques in the Large Volume Organic Chemical Industry*.

IPPC (February 2003), *Reference Document on Best Available Techniques for Mineral Oil and Gas Refineries*.

IPPC (May 2003), *Draft Reference Document on Best Available Techniques in the Food, Drink and Milk Industry*.

IRD, « Prix partenaires d'entreprises ANVAR-France Info : le laboratoire de microbiologie de l'IRD, Marseille, lauréat du Prix Recherche-Innovation 2001 », communiqué de presse, 23 octobre 2001, <http://www.ird.fr/fr/actualites/communiques/2001/medhycos.htm>.

MARTEL Bernard (1996), *Aide-mémoire de chimie organique industrielle*, Dunod, Paris.

MINISTÈRE FRANÇAIS DE L'ÉCOLOGIE ET DU DÉVELOPPEMENT DURABLE (2000), « Impacts du naufrage de l'Erika : quelques éléments de connaissances », 4 février 2000, <http://www.environnement.gouv.fr>.

MOHAN Anne Marie (2002), "Farmers lend an ear to grocery packaging", in *Packaging Digest*, July 2002.

OECD (1998), *Biotechnology for clean industrial products and processes*.

OECD (2001), *The application of biotechnology to industrial sustainability*.

OHMAN John, « Les plastiques à base de sucres végétaux deviennent une réalité mondiale », Cargill Dow Polymers, New York, communiqué de presse, 11 janvier 2000.

ORLOSKI Arnie, "Sony in Japan introduces 'green' packs", in *Packaging World*, August 2001.

OTV (1997), *Traiter et valoriser les boues*.

PATEL Martin (Dr.), BASTIOLI Catia (Dr.), MARINI Luigi (Dr.), WÜRDINGER Eduard (Dipl.-Geoökol.) (2003), "Environmental assessment of bio-based polymers and natural fibres", chapter in *Bio-polymers*, Vol.10, Wiley-VCH, 2003.

POUX Xavier (2000), *L'impact environnemental de la culture du maïs dans l'Union Européenne : options pratiques pour l'amélioration des impacts environnementaux*, Contrat n° B4-3040/98/000796/MAR/D1, Rapport de synthèse préparé pour la Commission Européenne, DG XI Environnement et sécurité nucléaire, Unité XI.D.1 Protection des eaux, conservation des sols, agriculture, Paris.

REYNE Maurice (1998), *Les plastiques*, Presses Universitaires de France, Paris.

SARTORIUS Ingo (2003), "Kunststoffe in Politik und Praxis", in *Kunststoffe*, 2/2003, München.

STEVENS E.S. (2002), *Green Plastics : An Introduction to the New Science of Biodegradable Plastics*, Princeton University Press, Princeton.

THE ASSOCIATION OF PLASTICS MANUFACTURERS IN EUROPE (APME) (2001), *Insight into consumption and recovery in Western Europe*, Brussels.

TOTALFINAELF, *2001 Environment and Safety Report*.

TUMBLESON Mike E., O'DONNELL Melanie (2002), *Proceedings from 2002 Planning Committee Conference*, University of Illinois and Corn Refiners Association Inc.

U.S. DEPARTMENT OF LABOR OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH ADMINISTRATION, *OSHA Technical Manual*, Section IV, Chapter 2: "Petroleum Refining Processes", http://www.osha.gov/dts/osta/otm/otm_iv/otm_iv_2.html.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (1995), *AP-42*. Fifth Edition, Volume I Chapter 5: Petroleum Industry, <http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch05/>.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (1995), *Compilation of Air Pollutant Emission Factors AP-42*, Fifth Edition, Volume I: "Stationary Point and Area Sources", Chapter 9: corn wet milling, Research Triangle Park, NC, <http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/index.html>.

US DEPARTMENT OF AGRICULTURE, US DEPARTMENT OF ENERGY (1998), *The technology roadmap for plant/crop-based renewable resources 2020, Research priorities for fulfilling a vision to enhance US economic security through renewable plant/crop-based resource use*, <http://www.oit.doe.gov>.

- VERLAG Carl Hanser (2002), « Zurück zur Natur – Trends bei Produktentwicklungen und Märkten von biologisch abbaubaren Werkstoffen“, in *KU Kunststoffe*, München, Jahrg. 92 (2002)9.
- VINK Erwin T.H., RÁBAGO Karl R., GLASSNER David, GRUBER Patrick R. (2003), « Applications of Life Cycle Assessment to Natureworks™ Polylactide (PLA) Production“, in *Polymer Degradation and Stability* 80 (2003) 403-419, Elsevier.
- WATSON Stanley A., RAMSTAD Paul E. (1987), *Corn Chemistry and Technology*, American Association of Cereal Chemists Inc., St. Paul, Minnesota.
- WEBER J. Claus (2000), *Biobased Packaging Materials for the Food Industry: Status and Perspectives*, A European Concerted Action, November 2000.
- WEBER J. Claus (2000), *The Food Biopack Conference*, A EU-concerted action project sponsored by EU DG XII, Conference Proceedings, Copenhagen, 27-29 August 2000.
- WEISSERMEL Klaus., ARPE Hans-Jürgen (2000), *Chimie organique industrielle*, traduction de la 3^e édition anglaise par Philippe Kalck et Brigitte Zahner, De Boeck Université, Paris.
- WHO Regional Office for Europe (2000), *WHO air quality guidelines*, 2nd edition, Copenhagen, <http://www.who.dk>.
- WILSON Jim (2000), “From Plants To Plastic“, in *Popular Mechanics*, May 2000.

QUELQUES APPLICATIONS DU POLYACIDE LACTIQUE



Source: Cargill Dow



Source : Cargill Dow



Source : Natura



Source : Cargill Dow

QUELQUES APPLICATIONS DU POLYSTYRÈNE
(Source : APME)



SITE DE PRODUCTION DE POLYACIDE LACTIQUE



Source : Cargill Dow

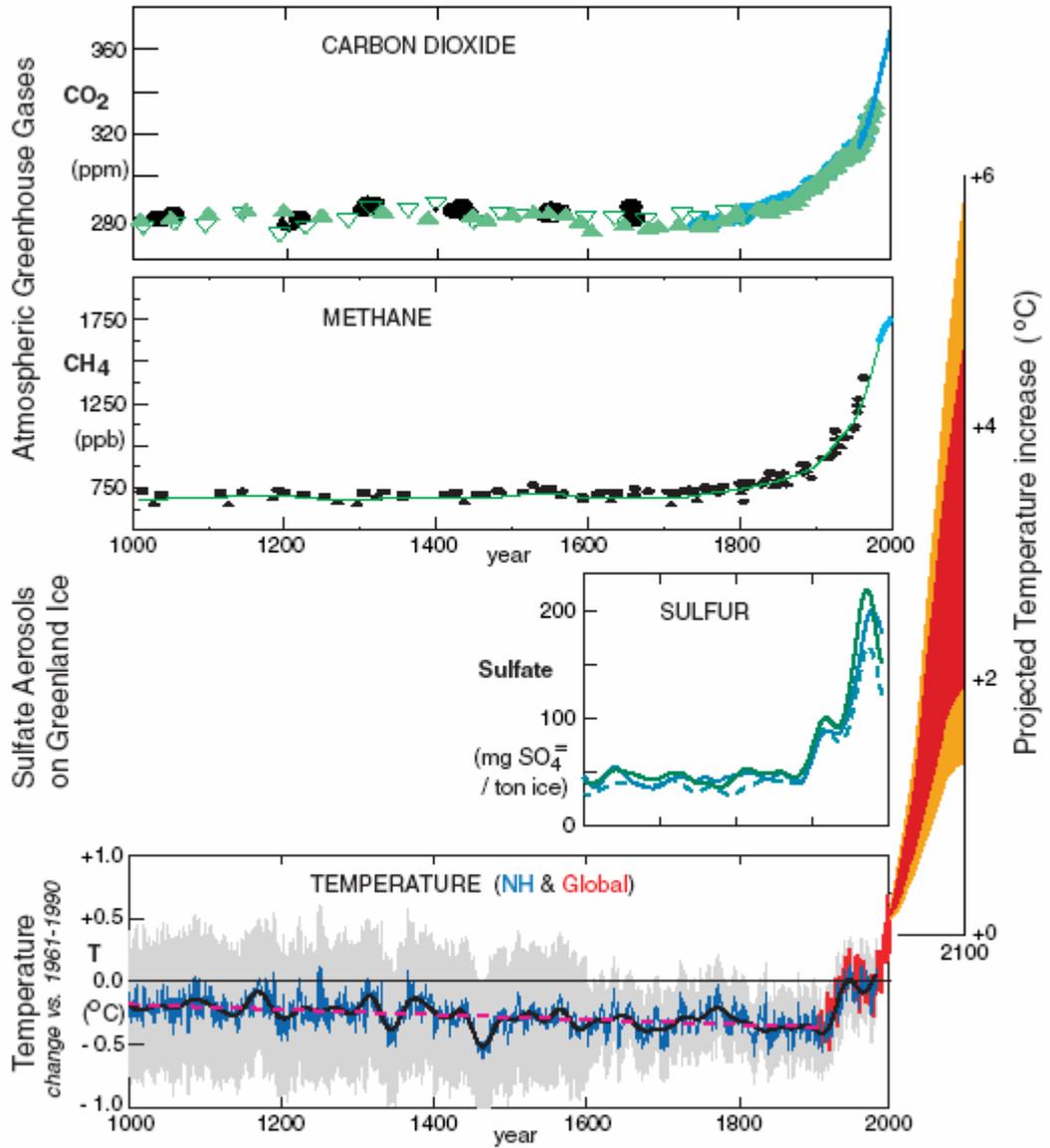
SITE DE PRODUCTION DU POLYSTYRÈNE



Site de BASF Antwerpen

THE HUMAN INFLUENCE ON ATMOSPHERE & CLIMATE

(IPCC/WG1: Climate Change 2001, SPM & Chapters 2, 3, 4, 5, 9)



(M.J. Prather, Jan 2001)