

Monétarisation des impacts environnementaux liés au recyclage

Le cas des papiers/cartons et des plastiques

ÉCONOMIE ET ÉVALUATION



Présent
pour
l'avenir

Collection « Études et documents » du Service de l'Économie, de l'Évaluation et de l'Intégration du Développement Durable (SEEIDD) du Commissariat Général au Développement Durable (CGDD)

Titre du document : « Monétarisation des impacts environnementaux liés au recyclage : le cas des papiers/cartons et des plastiques »

Directeur de la publication : Françoise Maurel

Auteurs : Ce document a été réalisé par le bureau d'études RDC Environnement pour le compte du MEDDTL. Il a été encadré par un comité de pilotage regroupant les représentants des fédérations professionnelles des secteurs des papiers/cartons et des plastiques.

Responsable du suivi MEDDTL : Doris Nicklaus CGDD/SEEIDD

Date de publication : Mai 2011

Ce document n'engage que ses auteurs et non les institutions auxquelles ils appartiennent.
L'objet de cette diffusion est de stimuler le débat et d'appeler des commentaires et des critiques.

Sommaire

RESUME	5
I. INTRODUCTION	13
II. RAPPELS METHODOLOGIQUES	15
II.1 Principes généraux pour la modélisation	15
II.1.1. Modéliser un différentiel entre situations.....	15
II.1.2. Identifier les effets en cascade	15
II.1.3. Etudier le marché pour la détermination des substitutions effectives.....	16
II.1.4. Allouer les impacts.....	16
II.1.5. Evaluer l'importance des effets dynamiques.....	17
II.1.6. Adopter l'approche « BASEE SUR LE MARCHÉ ».....	18
II.1.7. L'approche conséquentielle appliquée au recyclage	19
II.2 Monétarisation des impacts environnementaux	20
II.2.1. Concept et utilité	20
II.2.2. Calcul des facteurs de monétarisation.....	21
II.2.3. Coûts environnementaux totaux, coûts externes.....	21
II.2.4. Facteur de monétarisation pour l'effet de serre.....	22
II.2.5. Facteur de monétarisation pour la consommation de ressources energetiques non renouvelable	24
II.2.6. Facteur de monétarisation pour les nuisances.....	26
III. POINTS METHODOLOGIQUES SPECIFIQUES AUX ETUDES DE CAS CONSIDEREES	28
III.1 Champ de l'étude	28
III.2 Mix électrique	29
III.3 Limites de l'approche	30
III.3.1. Evolution dynamique du marché	30
III.3.2. Manque de consensus sur les facteurs de monétarisation.....	30
IV. RECYCLAGE DES PAPIERS/CARTONS	31
IV.1 Contexte	31
IV.2 Hypothèses de modélisation	31
IV.2.1. Champ de l'étude	31
IV.2.2. Limites de l'étude	32
IV.2.3. Prise en compte du carbone biogénique	32
IV.2.4. Unité fonctionnelle.....	33
IV.2.5. État des marchés concernés.....	34
IV.2.6. Données techniques.....	48

IV.3	Résultats	63
IV.3.1.	Rappels.....	63
IV.3.2.	Recyclage de cartons d'emballage (<i>Mixed grade</i>).....	64
IV.3.3.	Recyclage des journaux des ménages (<i>newspapers & magazines</i>).....	78
IV.3.4.	Recyclage de carton ondulé issu des commerces (<i>corrugated and kraft</i>)	95
IV.3.5.	Recyclage de papier de bureau (<i>high grade</i>)	109
IV.4	Synthèse	124
IV.4.1.	Hypothèses de modélisation.....	124
IV.4.2.	Résultats comparés	125
V.	RECYCLAGE DES PLASTIQUES	128
V.1	Généralités	128
V.1.1.	Champ de l'étude	128
V.1.2.	Etudes des marchés	129
V.1.3.	Hypothèses de modélisation communes	129
V.2	Recyclage de PET provenant de bouteilles	136
V.2.1.	Contexte actuel.....	136
V.2.2.	Hypothèses de modélisation spécifiques	136
V.2.3.	Résultats.....	143
V.3	Recyclage de PEHD provenant de flacons	154
V.3.1.	Contexte	154
V.3.2.	Hypothèse de modélisation.....	154
V.3.3.	Résultats.....	157
V.4	Recyclage de PEBD provenant de films	167
V.4.1.	Contexte	167
V.4.2.	Hypothèse de modélisation.....	167
V.4.3.	Résultats.....	171
V.5	Recyclage de PVC provenant de châssis de fenêtre	179
V.5.1.	Contexte	179
V.5.2.	Hypothèse de modélisation.....	179
V.5.3.	Résultats.....	183
V.6	Recyclage de PS provenant d'emballages thermo-formés	192
V.6.1.	Contexte	192
V.6.2.	Hypothèse de modélisation.....	192
V.6.3.	Résultats.....	194
V.7	Recyclage d'ABS provenant des DEEE	207
V.7.1.	Contexte	207
V.7.2.	Hypothèses de modélisation	207
V.7.3.	Résultats.....	209

V.8 Synthèse	222
V.8.1. Hypothèses de modélisation	222
V.8.2. Résultats comparés	223
VI. CONCLUSIONS	226
VI.1 Conclusions communes au recyclage des papiers cartons et des plastiques.....	226
VI.2 Recyclage des papiers cartons	227
VI.3 Recyclage des plastiques (dérivés de ressources fossiles)	229
VII. ANNEXES	232
LISTE DES TABLEAUX	261
LISTE DES FIGURES	265
ABREVIATIONS	268
GLOSSAIRE	269

Résumé

Le décideur public qui envisage de mettre en œuvre ou de supporter financièrement une action en faveur du recyclage d'un produit (matériau) cherche à comparer la dépense financière à effectuer aux conséquences économiques, sociales et environnementales de cette action. L'évaluation des conséquences environnementales suppose d'attribuer une valeur monétaire à l'ensemble des impacts environnementaux de l'action engagée, que ceux-ci soit négatifs ou positifs.

Le présent document tente de chiffrer le bilan environnemental global du recyclage d'une tonne supplémentaire de plastiques et de papier/carton issus des déchets triés. Il met en évidence que chaque tonne de plastique ou de papier/carton recyclé occasionne aujourd'hui des impacts environnementaux plus faibles qu'une tonne de plastique ou de papier/carton éliminée (stockée ou incinérée). Cette différence qui mesure le bénéfice environnemental du recyclage varie non seulement selon les types de matériaux mais aussi selon leur destination finale. En effet, le choix du type de matériau substitué par la matière recyclée a une influence déterminante sur les résultats.

Pour obtenir ces résultats chiffrés, ce travail a appliqué la méthodologie présentée dans le document « *monétarisation des impacts environnementaux du recyclage : guide méthodologique et applications* ». Ce guide, publié en novembre 2007, propose un accompagnement méthodologique destiné au praticien de l'analyse du cycle de vie et lui fournit les éléments nécessaires pour appliquer la méthode de monétarisation à l'analyse des enjeux environnementaux du recyclage des matériaux récupérés.

Le présent document rappelle les points méthodologiques essentiels pour monétariser les impacts environnementaux du recyclage puis présente leur application aux papiers/cartons et aux plastiques complétant ainsi les filières du verre et de l'aluminium étudiées en 2007.

I - Les principaux points méthodologiques pour la monétarisation des impacts environnementaux du recyclage¹

I.1 Les principes généraux essentiels qui ont guidé l'évaluation des impacts environnementaux du recyclage sont les suivants :

- 1. Modéliser un différentiel entre situations et identifier les effets en cascade** : il s'agit de représenter le différentiel entre la situation avec la **décision de recycler une quantité supplémentaire de matière X** sur le marché des matières à recycler **et la situation sans la mise en œuvre de cette décision**. Ceci suppose d'identifier toutes les conséquences directes et indirectes induites sur les marchés.
- 2. Adopter l'approche basée sur le marché** : les données utilisées doivent refléter fidèlement la réalité. Elles doivent ainsi correspondre aux technologies effectivement affectées par la décision prise (exemple : détermination des moyens de production d'énergie sollicités pour répondre à une demande supplémentaire).
- 3. Etudier le marché pour la détermination des substitutions effectives : il faut vérifier dans quelle mesure les effets indirects** liés à la réaction du marché (influence de l'élasticité des prix et de l'ampleur de la décision) **vont effectivement mener à une économie de production de matières vierges**. Une

¹ Pour une explication détaillée de la méthode utilisée (y compris celle relative à la monétarisation), nous renvoyons le lecteur au Guide méthodologique intitulé « Monétarisation des impacts environnementaux du recyclage : méthodologie et applications » - collection « Etudes et synthèses » - MEDAD - Novembre 2007 - http://www.ecologie.gouv.fr/IMG/pdf/071040a_-_doc_de_travail_monetarisation_recyclage2.pdf

analyse du marché est ainsi généralement nécessaire pour identifier les utilisations les plus probables des matériaux supplémentaires mis sur le marché.

4. Allouer les impacts : il s'agit de déterminer des règles d'affectation des impacts environnementaux lorsque ceux-ci peuvent concerner plusieurs systèmes. A titre d'exemple, la production du matériau vierge peut être accompagnée de la production d'un coproduit. Il s'agit alors d'établir une règle permettant de répartir les impacts environnementaux de la production entre le matériau vierge et le coproduit. L'allocation des bénéfices du recyclage est une question cruciale. Selon les matériaux, il est important d'analyser le marché des matières recyclées afin d'identifier quel est le facteur qui limite le recyclage : lorsque la demande en matière recyclée est supérieure à l'offre, le facteur limitant est la quantité de matière recyclée mise sur le marché (par la collecte sélective). Dans ce cas, les bénéfices du recyclage sont alloués au système qui fournit la matière recyclée.

5. Evaluer l'importance des effets dynamiques des marchés des matériaux qui peuvent considérablement modifier les équilibres des marchés (exemple : création de nouveaux débouchés pour les matières recyclables grâce à la mise au point d'une nouvelle technologie)

1.2 La monétarisation des impacts environnementaux

La monétarisation des impacts environnementaux consiste à estimer la valeur monétaire des impacts environnementaux d'une activité sur la société.

Les impacts environnementaux qui ont été monétarisés sont l'acidification de l'air, l'effet de serre, la dégradation de la qualité de l'eau, la toxicité humaine, la consommation de ressources naturelles, les nuisances locales (bruit, odeur, ...) et les dommages aux structures. Les impacts « destruction de l'ozone troposphérique » et « toxicité envers les écosystèmes » n'ont pas pu faire l'objet d'une estimation satisfaisante (données parcellaires voire inexistantes).

Les impacts environnementaux résultent de flux élémentaires (par exemple, les émissions dans l'eau, dans l'air, dans le sol, ...) qui contribuent à l'occurrence d'effets intermédiaires concrets (par exemple l'effet de serre, la destruction de l'ozone, la dégradation de la qualité des eaux, ...). Ces derniers conduisent à des effets ressentis par les êtres humains (perte d'années de vie ou de qualité de vie).

Pour évaluer ces effets il est nécessaire de déterminer la chaîne entre les flux élémentaires et ces effets et de leur donner une valeur monétaire. Le ratio entre la valeur monétaire des effets ressentis et le flux élémentaire qui en est responsable est appelé facteur de monétarisation.

Les effets ressentis peuvent être :

- ⇒ directs : ils découlent alors directement du flux élémentaire (les dommages ou bénéfices sont directement subis).
- ⇒ Indirects : l'effet ressenti découle des activités mises en place pour contrer (prévenir ou réparer) l'effet direct du flux élémentaire. Dans ce dernier cas, les effets ressentis par la société correspondent aux effets engendrés par la différence entre les impacts de l'activité de réparation et ceux de l'activité abandonnée.

L'attribution d'une valeur économique à l'effet ressenti est basée sur deux types d'approches : l'approche par le coût des dommages ou réparation du dommage et celle par le consentement à payer. La première est la plus répandue et les facteurs de monétarisation élaborés dans ce document reposent, en très grande partie, sur l'utilisation de cette approche.

Seule une partie de l'ensemble des coûts/bénéfices environnementaux qu'une activité génère in fine sur la société se trouve intégrée dans la détermination du prix sur le marché de l'activité. En conséquence, seule une partie des impacts environnementaux de l'activité est reflétée dans le prix que le responsable de son existence, le consommateur, paye pour en bénéficier. Cette partie correspond aux effets internalisés. Les effets non intégrés sont qualifiés d'externalités environnementales.

L'Etat peut utiliser différents leviers pour internaliser les effets environnementaux : la fiscalité, la réglementation sont les instruments les plus fréquemment utilisés.

Dans le présent document, le **coût environnemental total** correspond au bilan environnemental global du recyclage d'une tonne supplémentaire de matériau. Le **coût environnemental internalisé** correspond aux impacts environnementaux qui sont déjà pris en compte dans la détermination du prix sur le marché de l'activité. La part du coût environnemental total non internalisée correspond au coût environnemental externe.

II – Applications aux papiers/cartons et aux plastiques

Le champ de l'étude couvre les étapes du recyclage depuis la sortie du centre du tri jusqu'à l'élimination finale du déchet.

L'objectif est de déterminer les impacts environnementaux entre une situation dans laquelle on recycle une tonne supplémentaire de matériau en sortie de tri et une situation de référence dans laquelle ce « matériau » est éliminé (incinération et mise en décharge).

Pour chaque matériau étudié, les éléments de contexte déterminant les choix méthodologiques de modélisation ont été décrits : marché des matières (il s'agit de définir quelle est l'utilisation la plus probable du matériau supplémentaire mis sur le marché du recyclage), situation technologique de la production des matières vierges et des procédés de recyclage secteur de l'élimination, secteur de la production énergétique.

Les résultats sont calculés en utilisant les facteurs de monétarisation présentés dans le guide de monétarisation sur les impacts environnementaux du recyclage. Ils sont déterminés pour plusieurs variantes méthodologiques de modélisation et pour une variante de valeur du facteur de monétarisation liés aux gaz à effet de serre (GES) et à la consommation de ressources énergétiques non renouvelables. Le coût environnemental total est présenté ainsi que la partie externe de ce coût selon plusieurs degrés d'internalisation des impacts des GES et des impacts de consommation de ressources énergétiques non renouvelables.

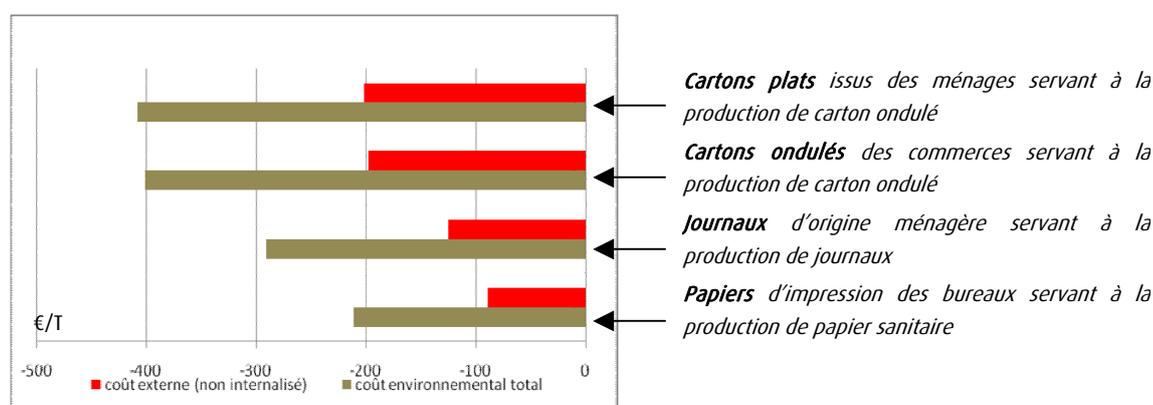
Note : Les résultats chiffrés de l'étude de monétarisation menée dans ce travail sont valables pour les cas étudiés. Ils correspondent à l'utilisation d'un type précis de matériau récupéré pour une application précise. L'extrapolation des résultats n'est pas toujours possible

II.1. L'application à la filière papier/carton

Le terme « papier/carton » regroupe une grande variété de matériaux présentant des caractéristiques différentes. L'étude a été réalisée pour quatre catégories de papiers/cartons récupérés sur la base de leur qualité et de leur origine et de leur destination finale :

- les papiers/cartons récupérés de type « Mixed grade » (boîte de céréales d'origine ménagère par exemple) qui servent principalement à la fabrication de carton ondulé
- les papiers/cartons récupérés de type « Newspaper /magazines » (journaux d'origine ménagère) destinés à la production de journaux
- les papiers/cartons récupérés de type « High grade » (papiers d'impression de bureau) utilisés dans la production de papier sanitaire
- les papiers/cartons récupérés de type « Corrugated & Kraft » (cartons ondulés des commerces) servant à la production de carton ondulé.

Graphique 1 – Différentiel du coût environnemental total entre le recyclage et l'élimination (incinération et stockage) d'une tonne supplémentaire de papier/carton récupéré



Scénario : la ressource (bois) non consommée grâce au recyclage d'une tonne de papier/carton supplémentaire permet de produire de la chaleur en substitution de l'énergie fossile

Remarque : les bénéfices environnementaux apparaissent en « coûts négatifs » (valeur négative).

Chaque tonne de papier/carton recyclé occasionne aujourd'hui des coûts environnementaux plus faibles qu'une tonne de papier/carton éliminée par stockage/incinération². Cette différence qui mesure le bénéfice environnemental du recyclage s'élève entre 211 et 408 € par tonne (cf. figure 1). Ces valeurs reflètent des cas particuliers associant une qualité de papier récupéré à une application. La moitié du surcoût d'une fin de vie « traditionnelle » (entre 89 et 202 € par tonne) n'est pas internalisée. Ainsi, le fait de ne pas recycler les papiers/cartons représente un coût pour la société dont la moitié environ n'est pas intégrée, en 2007, dans la détermination du prix des activités de gestion des déchets.

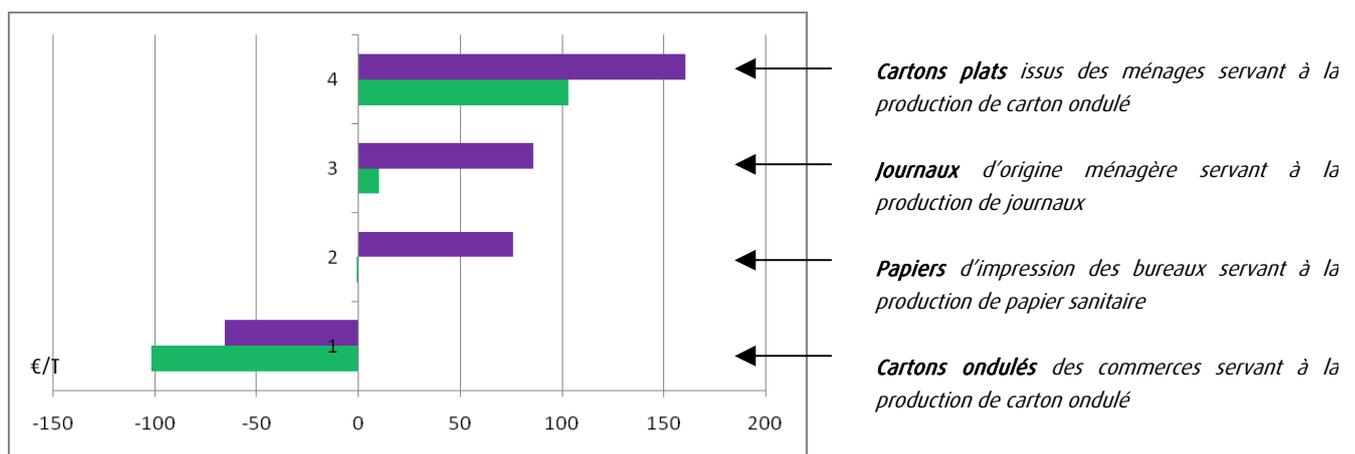
Ces chiffres montrent l'intérêt du point de vue environnemental de recycler davantage le papier/carton pour les quatre types de flux de papier-carton étudiés. Ces bénéfices environnementaux proviennent en majeure partie des économies de matières premières et de combustibles.

² Le modèle utilisé répartit la tonne de matériau éliminé entre le stockage et l'incinération sur la base des proportions actuellement constatées entre ces deux modes de traitement. Il tient également compte de la valorisation énergétique.

La valeur des facteurs de monétarisation des gaz à effet de serre et des consommations de ressources énergétiques d'origine fossile influence fortement le montant du bénéfice environnemental total. Ainsi, une augmentation de 20 % de l'impact « consommations de ressources énergétiques non renouvelables » entraîne, selon la catégorie de papier/carton considéré, une augmentation de 15 à 20 % du bénéfice environnemental total. De même, si l'on considère un objectif ambitieux de réduction des gaz à effet de serre (le coût marginal de réduction des émissions est alors plus élevé) le bénéfice environnemental total augmente de 10 à 40 % selon les flux de papiers/cartons recyclés considérés.

Néanmoins, ce sont les hypothèses relatives à l'utilisation effective de la ressource en bois non consommé grâce au recyclage d'une tonne supplémentaire de papier carton qui conditionnent le plus les résultats. Certaines conduisent même à identifier le recyclage comme moins favorable à l'environnement que la mise en décharge ou l'incinération. En l'absence de substitution effective du bois non consommé (cas d'une offre de bois supérieure à la demande) les impacts environnementaux du recyclage d'une tonne supplémentaire de PCR¹ peuvent être négatifs. C'est ainsi que dans ce cas l'utilisation d'une tonne supplémentaire de papier de bureau usagé pour la production de pâte à papier sanitaire génère un coût environnemental pour la société de 103 €/tonne. Ce coût est encore plus important (161 €/tonne) lorsque la ressource en bois libérée est utilisée comme source d'énergie en substitution d'une source d'énergie renouvelable (éolien, solaire, ...) (cf. graphique 2). Ceci s'explique essentiellement par le fait que la production de chaleur à partir du bois génère plus de coûts environnementaux (émissions d'oxydes d'azote et de particules principalement) que la production de chaleur à partir d'autres sources d'énergies renouvelables (éolien, solaire, ...).

Graphique 2 – Différentiel du coût environnemental total entre le recyclage et l'élimination (incinération et stockage) d'une tonne supplémentaire de papier/carton récupéré selon deux autres hypothèses d'utilisation du bois non consommé grâce au recyclage



- Scénario 1 : La ressource « bois » non consommée grâce au recyclage d'une tonne de papier supplémentaire permet de produire de la chaleur en substitution à de l'énergie d'origine renouvelable
- Scénario 2 : La ressource « bois » non consommée grâce au recyclage d'une tonne de papier supplémentaire n'est pas utilisée (offre de bois supérieure à la demande)

II.2. L'application aux plastiques

Les travaux de modélisation ont été menés sur six matériaux plastiques : le Polyéthylène Téréphtalate (PET), le Polyéthylène Basse Densité, le Polyéthylène Haute Densité, le Polychlorure de Vinyle (PVC), l'Acrylonitrile Butadiène Styrène (ABS), et le Polystyrène. Pour chaque plastique une application concrète a été étudiée :

- ⇒ la production de mobilier pour le PS
- ⇒ la production de châssis de fenêtre pour le PVC,
- ⇒ la production de sacs poubelles pour le PEBD,
- ⇒ la production d'enveloppes de téléviseurs pour l'ABS
- ⇒ la production de tuyaux pour le PEHD,
- ⇒ et la production de bouteilles pour le PET.

Chacune des applications a été choisie en fonction de sa pertinence compte tenu des informations disponibles sur le marché des plastiques.

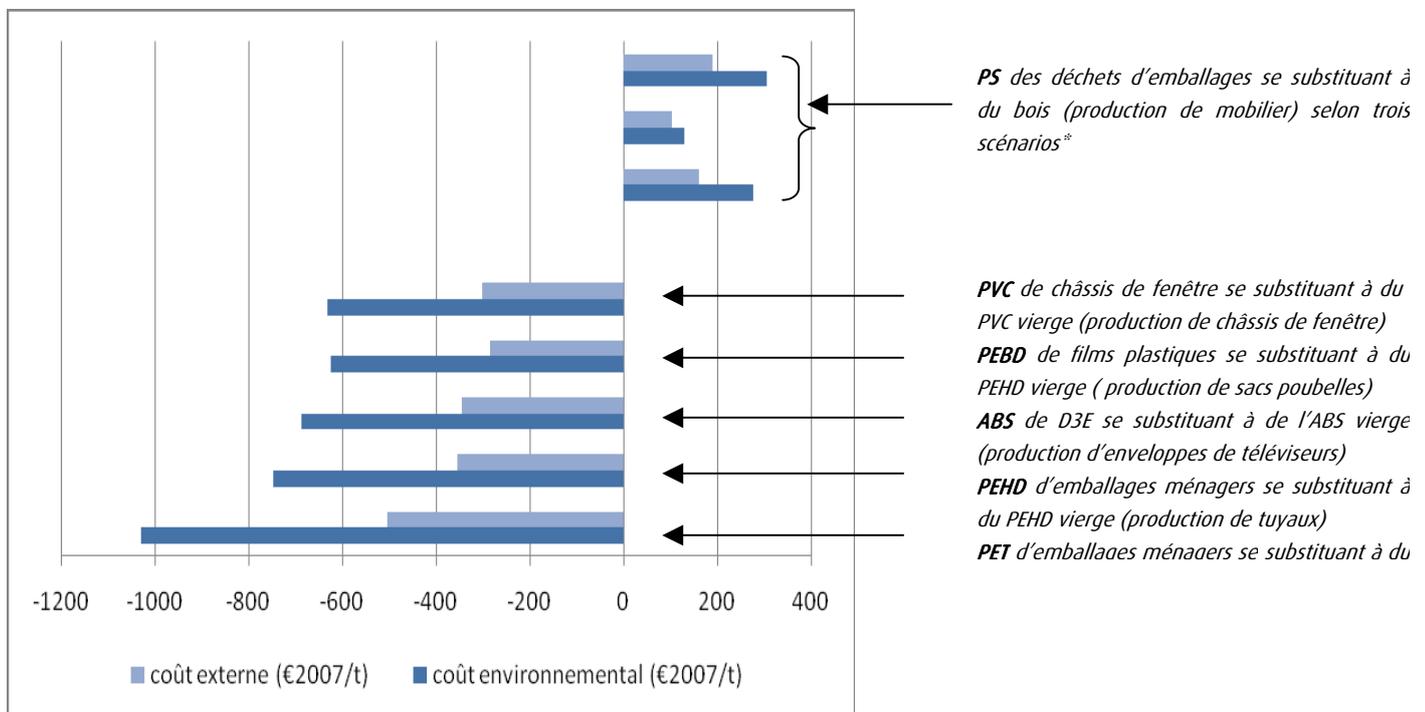
Les résultats des modélisations sont synthétisés dans le graphique 3.

Pour les hypothèses et scénarios envisagés, **le recyclage des plastiques** engendre un **bénéfice environnemental** significatif. Il se situe entre 600 et 1 000 € **lorsque la matière recyclée se substitue à la matière vierge de la même résine**. Le recyclage du PET génère le plus grand bénéfice environnemental, de l'ordre de 1 000 €/t, alors qu'il est de 600 à 750 €/t pour le PEBD, l'ABS, le PVC et le PEHD.

En revanche, **le recyclage des plastiques peut engendrer un dommage environnemental quand la matière recyclée se substitue à une autre matière (bois)**³. Le seul cas modélisé pour lequel un plastique ne se substitue pas à la même résine vierge est le polystyrène (le PS recyclé remplace du bois) : entre 130 et 300 €/t. Cela montre bien que le choix du type de matériau substitué par la matière recyclée a une influence déterminante sur les résultats.

³ Les impacts environnementaux liés aux économies de matières (cas de la production et transformation du bois en mobilier) sont inférieurs aux impacts environnementaux de la production de matières plastiques recyclées et leur transformation en mobilier.

Graphique 3 – Différentiel du coût environnemental total entre le recyclage et l'élimination (incinération et stockage) d'une tonne supplémentaire de plastiques (pour 6 catégories de flux de plastiques et applications liées)



() Scénario 1 – la ressource en bois non utilisée grâce au recyclage d'une tonne supplémentaire de polystyrène (utilisation pour la production de mobilier) n'est pas utilisée (cas d'une offre de bois supérieure à la demande)*

Scénario 2a – la ressource en bois non utilisée grâce au recyclage d'une tonne supplémentaire de polystyrène est utilisée pour produire de la chaleur en substitution d'une source d'énergie fossile

Scénario 2b – la ressource en bois non utilisée grâce au recyclage d'une tonne supplémentaire de polystyrène est utilisée pour produire de la chaleur en substitution d'une autre source d'énergie renouvelable.

Remarque : les bénéfices environnementaux apparaissent en « coûts négatifs » et ont donc une valeur négative.

Les bénéfices sont principalement liés aux économies de consommation de ressources fossiles et dans une moindre mesure à des gains sanitaires (moins d'émissions de particules et d'oxydes d'azote) et à la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Ces bénéfices proviennent essentiellement de la non-production de la matière vierge (et dans une moindre mesure de la mise en œuvre du produit vierge dans son application). Les phases qui génèrent un coût environnemental sont le procédé de recyclage et la mise en œuvre de la matière recyclée dans son application.

Les paramètres influençant le coût environnemental total sont les suivants :

- **Le taux de substitution⁴.** Le bénéfice est proportionnel au taux de substitution car l'économie de matière vierge, qui est la phase principale, est proportionnelle au taux de substitution.
- **La valeur donnée au CO2.** Ainsi, des objectifs ambitieux de réduction des gaz à effet de serre engendrent une augmentation de la valeur du facteur de monétarisation du CO2 (il devient plus cher de l'éviter) et se traduisent par une augmentation du bénéfice environnemental total du recyclage de plus de 20 %.

⁴C'est le rapport entre la quantité de matière remplacée et la quantité de matière recyclée nécessaire pour la remplacer. Il dépend de la différence de qualité entre la matière vierge et la matière recyclée.

- **La valeur du facteur de monétarisation relatif à la consommation de ressources fossiles énergétiques non renouvelables** joue également un rôle important. Plus ce facteur est élevé, plus le bénéfice environnemental du recyclage est important.
- **Le degré d'internalisation** : les coûts internalisés sont composés pour moitié du coût de l'énergie. Dès lors, une augmentation importante des prix des ressources énergétiques d'origine fossile (comme cela a pu être le cas au cours de la première moitié de l'année 2008) fait varier considérablement le taux d'internalisation de ce coût externe. Un baril de pétrole à 150 dollars réduit le coût environnemental externe à 10 % seulement du coût environnemental total. Le coût lié à la consommation d'énergie est entièrement internalisé et le coût externe ne représente plus alors que le coût monétarisé des autres catégories d'impacts.

Les coûts environnementaux externes représentent environ 50 % des coûts environnementaux totaux pour tous les plastiques (sauf pour le polystyrène). Ainsi, le fait de ne pas recycler les plastiques représente un coût pour la société dont la moitié n'est pas compensée financièrement par les acteurs économiques responsables de ce coût et des mesures gouvernementales.

III – Conclusions

Les résultats chiffrés de l'étude de monétarisation menée dans ce travail sont valables pour les cas étudiés. Ils correspondent à l'utilisation d'un type précis de matériau récupéré pour une application précise. Si ces résultats ne sont pas extrapolables à l'ensemble des deux filières étudiées, ils concernent néanmoins une partie importante des flux des papiers cartons et de plastiques.

Pour appréhender les incertitudes liées aux études de monétarisation des analyses de sensibilité ont été systématiquement introduites. Elles permettent de conclure que les résultats sont des ordres de grandeur acceptables des impacts environnementaux liés au recyclage des matériaux étudiés.

Les coûts environnementaux totaux sont intéressants à déterminer pour la mise en œuvre de mesures normatives ou informatives (affichage environnemental par exemple). Les externalités environnementales sont intéressantes à déterminer pour la mise en œuvre d'instruments économiques dont l'objectif est basé sur les produits/systèmes ou sur les flux élémentaires (par exemple une taxe sur l'utilisation de matières premières, sur les produits, ou sur les émissions polluantes, dont le montant devrait être égal au coût environnemental non internalisé.

I. Introduction

Savoir dans quelle mesure les bénéfices environnementaux du recyclage justifient des surcoûts à supporter par la société est une question fondamentale pour le décideur public.

Le décideur public qui envisage de mettre en œuvre ou de supporter financièrement une action en faveur du recyclage d'un produit (matériau) cherche à comparer la dépense financière à effectuer aux conséquences environnementales (externes) de l'action.

La question qui se pose alors peut s'exprimer de la façon suivante :

Quelles sont, exprimées en valeur monétaire, les conséquences environnementales résultant de la décision de recycler en France une tonne supplémentaire du matériau X ?⁵

La réponse à une telle question passe par la réalisation d'analyse coûts bénéfices nécessitant d'attribuer une valeur monétaire à l'ensemble des coûts et des bénéfices environnementaux.

Ce rapport présente, après la première version du Guide méthodologique proposée en novembre 2007 et examinant les cas particuliers du recyclage de l'aluminium et du verre, des exemples de monétarisation du recyclage pour d'autres flux :

- les papiers et cartons ;
- les plastiques, soit :
 - le Polyéthylène Téréphtalate (PET) ;
 - le Polyéthylène Basse Densité (PEBD) ;
 - le Polyéthylène Haute Densité (PEHD) ;
 - le Polychlorure de Vinyle (PVC) ;
 - l'Acrylonitrile Butadiène Styrène (ABS) ;
 - le Polystyrène.

Ce rapport rappelle en première partie les grands points méthodologiques pour la monétarisation. Pour une explication détaillée de la méthode utilisée (y compris celle relative à la monétarisation), nous renvoyons le lecteur au Guide méthodologique intitulé « Monétarisation des impacts environnementaux du recyclage : méthodologie et applications » - collection « Etudes et synthèses » - MEDAD – Novembre 2007).

Note : l'évaluation environnementale des impacts et bénéfices du recyclage des matériaux est une question majeure pour la décision de recycler ou non un matériau. Néanmoins, , d'autres éléments sont fondamentaux comme :

- l'existence de marchés ou de potentiels pour assurer une pérennité à la filière de recyclage ;
- la mise en œuvre de collecte sélective qui permet de fournir des fractions de matériaux appropriées par rapport aux techniques de recyclage disponibles et si possible au plus faible coût pour la société.

⁵ L'unité fonctionnelle considérée est une tonne supplémentaire de matière à recycler, ce qui représente une augmentation marginale de l'offre en matière recyclée. Cependant, le fait de travailler sur la base d'études de marché pour analyser les débouchés possibles des matières recyclées afin de définir si la demande est structurellement supérieure à l'offre (il est implicitement supposé que la qualité du recyclat convient pour l'application envisagée) nous permet de généraliser les effets de cette augmentation marginale aux gisements considérés par l'étude.

Remarque

Le présent document vise à appliquer à de nouveaux matériaux la méthodologie développée dans le Guide méthodologique de 2007. Il n'a pas pour objectif de remettre en cause cette méthodologie.

Rappelons également que la précédente étude n'a pas fait l'objet d'une revue critique extérieure en tant que telle mais a été présentée à un grand nombre d'acteurs consultés par le Ministère qui l'ont commentée et discutée en réunions élargies. Les organismes consultés sont :

- Pouvoirs publics : Ministère de l'Industrie, ADEME
- Eco-organismes : Eco-Emballages
- Industrie du verre : Saint Gobain, Fedeverre, Cyclem et FEVE
- Industrie de l'aluminium ; Alcan France Alu Recyclage, Arcelor, EAA, FEDEM (fédération des non ferreux), Fédération française de l'acier, IISI (International de l'industrie sidérurgique)
- Autres organisations professionnelles : FNADE, FEDEREC, Valorplast, CEPI, Revipap
- Associations : France Nature Environnement
- Bureaux d'études : Bio Intelligence Service, M. LECOULS, Ernst & Young

II. Rappels méthodologiques

II.1 Principes généraux pour la modélisation

II.1.1. Modéliser un différentiel entre situations

La mise en œuvre d'une décision perturbe le système visé et entraîne des conséquences en cascade. Pour déterminer les impacts environnementaux de la décision, le modèle établi doit **représenter le différentiel entre la situation avec et la situation sans la mise en œuvre de cette décision.**

Dans le cas de la décision de recycler, la perturbation initiale est la mise à disposition d'une quantité supplémentaire de matière X sur le marché des matières à recycler.

Modéliser les effets de cette perturbation requiert d'identifier et de définir toutes les conséquences directes et indirectes induites sur le marché.

II.1.2. Identifier les effets en cascade

Le recyclage d'un matériau déplace les points d'équilibre en incitant à des réactions des marchés affectés. Ces réactions ont des répercussions tant au sein du cycle de vie du produit étudié (le produit/matériau recyclé) que dans d'autres cycles de vie (le produit substitué, les matériaux profitant des capacités d'incinération libérées).

Outre les effets directs (collecte non sélective et élimination évitées, collecte sélective engendrée), de nombreuses répercussions indirectes (en cascade) découlent du recyclage d'un matériau donné.

Ces conséquences indirectes doivent être identifiées et prises en compte si elles ne sont pas négligeables. Idéalement, il convient d'étendre les limites du système investigué de façon à inclure tous les procédés qui sont affectés par une réduction ou une augmentation de flux au départ du système étudié ou vers le système étudié.

Exemple : Pour les papiers/cartons, le système étudié est étendu à la ressource bois et aux conséquences qu'elle subit en cas de diminution de son utilisation dans le secteur papetier (suite au recyclage d'une quantité supplémentaire de papiers).

Dans la pratique cependant, il faut arrêter l'extension du système au stade où les effets de toute extension supplémentaire du système seraient si faibles ou si incertains qu'ils n'apporteraient aucune information supplémentaire utile à la décision.

Un consensus existe pour préconiser, par défaut, que soient retenus dans le système l'ensemble des processus qui contribuent, individuellement, à plus de 4 % de la masse des inputs⁶ (ce critère est le plus facile à utiliser dans la pratique).

Il est cependant important d'éviter de trop décomposer un (une partie de) modèle en procédés qui seraient chacun négligeables et négligés mais globalement importants.

⁶ Ce seuil est tel que la probabilité est très grande (92 %) de couvrir 80 % des impacts.

II.1.3. Etudier le marché pour la détermination des substitutions effectives

En théorie, déterminer quelle(s) sera(ont) la(es) substitution(s) effective(s) demande une véritable analyse de marché, décrivant les propriétés du produit, analysant les différents segments (localisation temps et espace, consommateurs). Les réactions du marché à l'apport d'une quantité supplémentaire de matériau recyclé sont fonction de paramètres économiques, technologiques et législatifs. Ils sont eux-mêmes influencés par les contextes géographique et temporel et par l'ampleur de la décision.

La(les) substitution(s) effective(s) dépend(en)t également des quantités concernées par la décision. Elles sont *in fine* déterminées par l'élasticité de l'offre et de la demande sur le marché de la matière recyclée.

II.1.4. Allouer les impacts

Des procédures d'allocation interviennent lorsque le système étudié inclut des procédés qui remplissent plusieurs fonctions (*procédés multifonctions*) relatives à des systèmes différents. Les impacts de ces procédés sont donc partagés entre plusieurs unités fonctionnelles : celle étudiée (*unité fonctionnelle primaire*) et (au moins) une extérieure (*unité fonctionnelle secondaire*). La question qui se pose est de savoir comment attribuer (répartir) les impacts des procédés multifonctions entre les différentes unités fonctionnelles.

- Les procédés à plusieurs flux sortants utiles ("multi-outputs") pour lesquels on obtient soit un produit principal et des coproduits, soit différents produits tous intéressants.

Par exemple, l'électrolyse du sel produit à la fois du chlore, une solution de NaOH et de l'hydrogène. Lors du recyclage du PVC, on économise la production du PVC et donc d'un de ses composants, le chlore. Il faut dès lors déterminer quelle part des impacts environnementaux de l'électrolyse attribuer au chlore.

- Les procédés à plusieurs flux entrants utiles ("multi-inputs"). Typiquement, il s'agit des procédés de collecte et de traitement de déchets.

Par exemple, l'incinération des déchets d'emballage avec production d'énergie est un procédé traitant conjointement plusieurs flux de matériaux différents (les déchets emballages, mais également les déchets non considérés par l'analyse).

Les procédés à plusieurs flux utiles, à la fois un flux entrant et un flux sortant (« recyclage en boucle ouverte ») : c'est le cas quand le matériau d'un produit est recyclé en un autre produit (autre cycle de vie) c'est-à-dire quand le producteur et l'utilisateur du déchet recyclé ne sont pas les mêmes. Dans ce cas, le procédé étudié remplit la fonction de traitement des déchets conjointement à celle de production de matériau recyclé dans un ou plusieurs autre(s) cycle(s) de vie.

Par exemple, PEHD flacon recyclé dans la fabrication de tuyaux.

→ La question qui se pose ici est de savoir comment attribuer les impacts de ces procédés entre les unités fonctionnelles intervenant en cascade, c'est-à-dire les unités fonctionnelles qui, au travers du recyclage, utilisent le matériau étudié. C'est un point crucial de la méthodologie.

Le recyclage est dit en boucle fermée lorsque le producteur et l'utilisateur du déchet recyclé sont les mêmes. Dans ce cas, il n'y a pas de problème d'allocation (exemple de boucle fermée : recyclage en interne des résidus de production de verre). Notons que de nombreux cas (verre, acier, aluminium) ont l'apparence d'une boucle fermée mais sont en réalité des boucles ouvertes. En effet, même s'il y a un mélange et un remplacement de matières vierges identiques, les

applications ne sont pas les mêmes. Le bénéfice environnemental est connu mais il faut l'attribuer soit à l'application qui fournit la matière recyclée, soit à l'application qui la consomme.

Il n'existe pas de méthode universellement acceptée quant à la détermination de la répartition (allocation) des impacts (émissions, consommations, bénéfices) entre différents systèmes. Des choix raisonnés en fonction de l'objectif de l'étude, sont donc posés. Les procédures d'allocation les plus fréquemment utilisées pour l'allocation des impacts et bénéfices environnementaux liés au recyclage des matériaux sont les suivantes :

- Extériorisation complète (0/100) = Cut-off (ou "méthode des stocks") : le matériau recyclé est transféré "sans impact". Aucun bénéfice du recyclage n'est attribué au produit qui fournit le matériau recyclé. Le système en aval qui utilise la matière recyclée n'est pas pris en compte. Pour le système amont, qui fournit la matière recyclée, il n'y a pas de fin de vie. Pour le système aval, qui utilise la matière recyclée, il n'y a pas de production de la matière.
- Expansion du système ou prise en compte du système aval qui utilise la matière recyclée : le problème de l'allocation devient un problème de modélisation du système étendu (le produit -système- qui fournit le matériau recyclé ET le système en aval qui utilise la matière recyclée). Cette méthode est préconisée par l'ISO 14044. L'allocation des bénéfices entre les deux systèmes peut se faire de 5 façons différentes :
 - **Allocation sur base économique**, fonction de la valeur marchande de la matière vierge (V) et de la matière recyclée (R) : X % (où $X = V/(V+R)$) des impacts environnementaux (de la production de la matière, de la collecte et du recyclage et de la fin de vie du matériaux après sa dernière utilisation) sont attribués au produit qui utilise la matière vierge.
 - **Allocation 50/50** : 50 % des bénéfices sont alloués au produit qui fournit le matériau recyclé et 50 % au système en aval.
 - **Allocation 100/0** : 100 % des bénéfices sont alloués au produit qui fournit le matériau recyclé.
 - **Allocation 0/100** : 100 % des bénéfices sont alloués au produit qui utilise le matériau recyclé.
 - **Analyse de marché (approche conséquentielle)** : les bénéfices sont alloués au système qui limite le développement du recyclage. Dans ce cadre, l'approche de modélisation conséquentielle (basée sur le marché) consiste à regarder les conséquences d'une variation de l'offre en recyclé (grâce à la collecte sélective, il y a un supplément de matière recyclée sur le marché). Cette méthode est préconisée par plusieurs experts ACV, dont RDC et Ecobilan (cf. plate-forme méthodologique d'échanges "Affichage environnemental des produits grande consommation") et a été acceptée par plusieurs comités de revue critique (TNO, VITO...).

Il est important de rappeler que les données d'émissions issues de la littérature sont souvent fournies sous forme agrégée, impliquant que des procédures d'allocation leur sont inhérentes. C'est très souvent le cas pour les procédés de production de matières premières. Dans la plupart des cas, il s'agit d'une allocation basée sur des critères physiques (masse ou contenu énergétique). Il est fréquent (pour la production en tout cas) que les différentes méthodes donnent des clés de répartition similaires. Dans ce cas, l'influence sur les résultats est limitée.

II.1.5. Evaluer l'importance des effets dynamiques

De manière générale, et par simplification, les marchés des matériaux (primaires et secondaires) sont considérés comme stables.

Cependant, des effets dynamiques peuvent exister dans un système de recyclage (par exemple, développement des technologies suite à l'augmentation/évolution de la demande en matière recyclée) et les paramètres utilisés pour analyser les effets à court terme de la décision de recycler davantage peuvent ne plus être exacts à long terme.

Ces effets dynamiques sont souvent limités mais ceci mérite d'être vérifié avant de les négliger.

II.1.6. Adopter l'approche « BASEE SUR LE MARCHE »

La règle générale en matière de modélisation est que les données utilisées doivent refléter fidèlement la réalité. Elles doivent donc correspondre aux technologies effectivement affectées (qui ne sont pas nécessairement représentatives de la situation technologique actuelle moyenne du secteur concerné). Il s'agit d'identifier les changements réellement attendus en réponse à la perturbation imposée par la décision prise.

De cette façon seulement, les résultats refléteront les conséquences effectives de la décision prise.

La détermination des technologies (procédés) qui sont réellement affectées par la décision nécessite de tenir compte :

- du contexte géographique,

Le contexte géographique de la prise de décision doit être précisé car c'est le point de départ de la délimitation géographique des marchés (des technologies) affectés. Par exemple : marché de l'électricité (en négligeant les échanges sur le réseau européen), marché des matières premières, marchés du recyclage, marchés de l'élimination des déchets (part et performance de l'incinération), marché des matières recyclées.

- de l'échelle de temps considérée,

Il est également nécessaire de prendre en compte le terme sur lequel porte l'analyse afin de déterminer les technologies à considérer.

A très court terme, la décision affecte le parc technologique existant (variations au sein des capacités de production existantes). A plus long terme, elle affecte les technologies qui seront sollicitées en réponse à une variation de la demande en cette technologie (augmentation ou diminution, selon la tendance générale du marché).

Par exemple, l'efficacité de la récupération d'énergie lors de l'incinération s'améliore progressivement (disparition d'anciennes unités peu efficaces, construction de nouvelles unités très performantes et investissements dans les installations existantes). A court terme, le recyclage permet d'éviter une incinération peu efficace et les avantages du recyclage sont importants. A long terme, si l'incinération permet de produire de l'énergie de façon efficace, le recyclage présentera moins d'avantages.

- de la tendance générale (au sein des marchés affectés),

Les tendances du marché déterminent les orientations technologiques.

Par exemple, en cas de tendance croissante, les **technologies à capacité de production limitée** (fixée) ne peuvent jamais être considérées comme des technologies qui seront spécifiquement sollicitées suite à la décision. Ces capacités peuvent être limitées en raison :

- de contraintes physiques (présence d'eau et d'une pente pour l'énergie hydraulique),
- de contraintes politiques (quotas max d'émission, interdictions),
- de contraintes de marché pour leurs co-produits (ex. cogénération).

- de l'ampleur de la décision.

Dans le cas où les perturbations étudiées sont petites par rapport au volume (de produit, de services) concerné, on peut considérer que les relations de cause à effet sont linéaires.

Par contre, pour une variation qui serait d'ampleur plus importante, il y a possibilité d'effets non linéaires au sein même du marché du matériau concerné. Dans ce cas, on ne s'inscrit plus uniquement dans une évolution du marché mais on influence la tendance générale du marché.

L'approche conséquentielle est une démarche " basée sur la marché " par opposition à une approche " moyenne"⁷. L'approche moyenne est une approximation acceptable uniquement pour les procédés dont le marché est très stable et très homogène du point de vue technologique (ex : production d'eau) ou dont le marché est affecté de manière uniforme.

Le choix d'une approche conséquentielle au lieu d'une approche moyenne a une influence majeure sur les résultats. Il convient dès lors d'accorder beaucoup de rigueur à cet aspect de la modélisation⁸.

Note : dans la littérature, cette approche est également appelée " marginale ", mais ce terme portant à confusion (la modélisation vise tant des variations infinitésimales que plus importantes), il est préférable de ne plus l'utiliser.

II.1.7. L'approche conséquentielle appliquée au recyclage

Les conséquences des actions en faveur du recyclage dépendent :

- De l'étape qu'elles ciblent dans la chaîne de recyclage :
 - Action favorisant la collecte sélective et la mise à disposition de matière recyclée
 - Action favorisant l'utilisation de matière recyclée
- De la situation du marché :
 - Lorsque la demande pour la matière recyclée est forte et que la collecte sélective est insuffisante pour satisfaire les besoins, toute augmentation de la quantité de matière collectée sélectivement se traduit par une augmentation du recyclage et une diminution de la consommation de matières vierges. Inversement, créer de nouveaux débouchés en intégrant de la matière recyclée ne fera pas nécessairement augmenter la quantité recyclée ; la balance nette des impacts environnementaux de chaque application est alors à étudier.
 - Lorsque la demande est faible pour la matière recyclée et que la collecte sélective est surabondante, les débouchés pour la matière recyclée qui permettent de diminuer la consommation de la même matière vierge sont difficiles à trouver.⁹ Créer de nouveaux débouchés en intégrant de la matière recyclée se traduit alors par une augmentation du recyclage aux dépens de la consommation de matières vierges. Inversement, une augmentation de la quantité de matière collectée sélectivement ne fait pas augmenter la quantité recyclée et ne génère pas de bénéfice environnemental.

⁷ Procédés reflétant la situation de départ ou la situation à laquelle conduit, à terme, la décision.

⁸ Pour en savoir plus : Weidema (1999) et Weidema (2004).

⁹ " qui permettent de diminuer la consommation de la même matière première " : cette condition est importante. En effet, le marché trouve toujours preneur *via* un ajustement des prix, mais pas pour des substitutions à haute valeur ajoutée environnementale (i.e. de la même matière première).

Le tableau ci-dessous résume l'efficacité (autrement dit la diminution de la consommation de matières vierges) des actions en faveur du recyclage en fonction de leur cible (offre de déchets recyclables ou demande de matières premières secondaires) et de la situation du marché :

		Situation de marché de la matière récupérée	
		demande forte	offre forte
Positionnement de l'action	favoriser la collecte sélective et la mise à disposition de matière récupérée	efficace	pas (peu) d'effet
	favoriser l'utilisation de matière récupérée	pas (peu) d'effet	efficace

Le bénéfice environnemental du recyclage (l'économie de production de matières premières moins les impacts de la collecte et du procédé de recyclage) doit être « attribué » à l'action qui permet une augmentation du recyclage. Dans le cas où la demande est plus forte que l'offre, l'attribution se fait à la matière à recycler et non à la matière recyclée.

Notons que le cas où le marché est saturé à long terme (surabondance de matière secondaire) est très rare : si la qualité de la matière recyclée reste adéquate à taux de collecte croissant, elle trouvera un débouché puisque son marché est par définition (sauf en cas de décroissance très forte) au moins aussi grand que la quantité collectée. En effet, le recyclage en boucle fermée avec 100 % d'intégration est souvent possible. Etant donné que le marché a tendance à s'adapter, l'excédent d'offre en matière recyclée ne sera généralement que temporaire.

Remarque : Exemples d'application

1. Le cas où une matière recyclée prévue pour une certaine application ne trouve pas acquéreur et doit être redirigée vers une application sans réel bénéfice environnemental est considéré comme une situation de marché saturé (offre supérieure à la demande). Dans ce cas, le bénéfice du recyclage sera alloué à l'utilisation de matière recyclée dans une application adéquate.
2. Dans le cas d'un marché où l'offre est inférieure à la demande, on n'alloue normalement aucun bénéfice environnemental à l'utilisation de matière recyclée. Cependant, si l'on étudie le bénéfice environnemental d'un nouveau débouché à plus forte valeur ajoutée que les applications existantes, il faut lui allouer un bénéfice égal au delta entre le gain environnemental de l'application existante et son propre gain environnemental.

II.2 Monétarisation des impacts environnementaux

II.2.1. Concept et utilité

La monétarisation consiste à estimer la valeur monétaire des impacts d'une activité sur la société.

La valeur monétaire qui est attribuée aux différents impacts correspond à la valeur des dommages et/ou des bénéfices qu'ils causent à la société.

Le facteur de monétarisation exprime cette valeur par unité d'impact. La détermination de la valeur des facteurs de monétarisation est une tâche complexe, qui nécessite généralement d'établir un modèle, dépendant toujours d'hypothèses de modélisation et parfois du contexte géographique et temporel.

La monétarisation est utile en complément des méthodes d'évaluation classiques qui, soit ne couvrent qu'un type d'impact (ex : analyse financière, analyse de l'emploi), soit couvrent plusieurs catégories d'impacts mais sans pouvoir les **pondérer** entre elles (ex : potentiel de réchauffement climatique et consommation de ressources fossiles).

II.2.2. Calcul des facteurs de monétarisation

La monétarisation des impacts environnementaux est basée sur une approche de réparation/indemnisation du dommage. Un dommage environnemental est subi. Une action de réparation est mise en œuvre pour réparer ce dommage. En faisant l'hypothèse que le particulier ou la personne publique qui réalise l'activité de réparation dispose d'un budget constant, la mise en œuvre de cette réparation s'accompagne de l'abandon d'une autre activité équivalente en terme de dépense.

On peut également utiliser le coût de prévention du dommage. Il peut jouer comme majorant ou minorant par rapport au coût de réparation. Si une nuisance a un niveau tel que généralement on essaie de la prévenir, c'est que la valeur du dommage est supérieure au coût de prévention. Ce coût de prévention est donc un minorant du dommage qui aurait eu lieu sans cette action de prévention.

II.2.3. Coûts environnementaux totaux, coûts externes

La question de l'internalisation des coûts environnementaux est également une question fondamentale. En effet, le prix d'une activité, d'un bien ou d'un service ne reflète qu'une partie des impacts environnementaux générés. Cette partie correspond aux effets internalisés (pris en compte dans le prix), tandis que les autres effets sont appelés les effets externes ou externalités.

Selon l'objectif de l'évaluation conduite, il sera justifié de prendre en compte seulement les externalités ou également les effets internalisés :

- Pour des objectifs d'information ou de normalisation, il est plus judicieux de considérer l'ensemble des effets environnementaux, de façon à favoriser les systèmes les plus performants d'un point de vue environnemental.
- Pour des objectifs d'instruments économiques (taxes, aides financières), il est préférable de ne considérer que les effets externes, qui seront ceux sur lesquels reposera in fine l'assiette de l'instrument économique.

Pour chaque facteur de monétarisation, un taux d'internalisation est déterminé. Il prend des valeurs entre 0 et 100 % en fonction de l'existence d'instruments d'internalisation :

- La valeur du taux d'internalisation est de 0 % :
 - lorsqu'il n'y pas de mesures prises,
 - lorsque des mesures sont prises mais la part des coûts internes par rapport aux coûts externes est négligeable,
 - lorsque la mesure n'a pas d'effet incitatif.

- La valeur du taux d'internalisation est de 100 % lorsque la totalité des coûts des effets environnementaux sont supportés par les acteurs qui en sont responsables.
- La valeur du taux d'internalisation est intermédiaire lorsqu'un instrument est mis en place et/ou que les mécanismes de marché permettent une indemnisation pour le dommage (on paie pour l'utilisation de ressources, pour l'utilisation de l'espace) sans toutefois couvrir la totalité des coûts environnementaux.

En pratique, on est toujours dans une situation intermédiaire car :

- Il y a toujours une part internalisée : l'énergie est coûteuse et intervient de façon sensible dans les impacts environnementaux mais il y a aussi des taxes sur la mise en décharge, des droits d'émissions de CO₂...
- Il y a toujours une part non-internalisée : on paie en général peu ou pas pour les émissions (NO_x, SO₂, polluants dans l'eau), les nuisances (bruits, odeurs...). Ceci est vrai même en cas d'internalisation indirecte à travers le coût que fait peser, sous la forme de menaces sur la poursuite de l'activité économique (risque économique), la pression des riverains ou des Autorités.

Le facteur de monétarisation de l'effet de serre et de la consommation de ressources sont détaillées ci-après. L'ensemble des facteurs de monétarisation sont présentés dans le Guide méthodologique sur la Monétarisation (page 42 à 79).

II.2.4. Facteur de monétarisation pour l'effet de serre

La modélisation des conséquences de l'émission de gaz à effet de serre (GES) est différente selon les deux cas de figure rencontrés :

- L'émission de gaz à effet de serre (GES) par l'activité étudiée est accompagnée d'une réduction équivalente d'émission par une autre activité.

Cette situation se rencontre typiquement pour les émissions de GES soumis aux mécanismes de quotas / droits d'émissions (les secteurs concernés se voient attribuer des quotas d'émissions accompagnés de droits d'émettre qu'ils peuvent vendre/acheter sur un marché des droits d'émission¹⁰).

Nous considérons que cette situation se rencontre également pour les émissions de GES faisant l'objet d'inventaires et de reporting dans le cadre d'objectifs nationaux de réduction des émissions de GES. En effet, nous estimons que l'atteinte d'un objectif global de réduction finit par concerner, indirectement via l'adaptation des politiques mises en œuvre, tous les secteurs.

- L'émission de GES par l'activité étudiée est nette, supplémentaire. Cette situation se rencontre pour tous les GES non concernés par un effort de limitation des émissions totales.

Dans le cas de notre approche, nous nous situons dans le cas où les GES sont concernés par un effort de limitation des émissions totales.

Lorsque l'émission de GES est soumise à droit d'émission, cela implique qu'un droit d'émettre a été acheté à un vendeur qui en conséquence diminue son émission propre de GES d'une quantité identique. Il n'y a donc pas d'émission nette, mais une compensation des émissions. La conséquence est que le vendeur du droit de polluer réalise un investissement pour diminuer ses émissions.

¹⁰ En Union européenne, le système ne couvre que les émissions de CO₂, et uniquement celles en provenance des grands émetteurs du secteur de la production de chaleur et d'électricité ainsi que, dans certains secteurs industriels consommant beaucoup d'énergie, soit les installations de combustion, les raffineries de pétrole, les fours à coke, les aciéries, la sidérurgie et les usines de production de ciment, de verre, de chaux, de briques, de céramique, de pâte à papier et de papier. Récemment, une proposition de directive vise à y inclure le transport aérien (tous les vols depuis ou vers les aéroports européens en 2010). Un seuil fondé sur la capacité de production ou le rendement détermine le choix des installations incluses dans le système.

Le prix d'échange du droit d'émission sur le marché est déterminé par le coût de la mesure marginale de réduction à mettre en œuvre pour éviter la dernière tonne qui permet d'atteindre l'objectif. Or, plusieurs objectifs d'émissions totales ont été fixés par le législateur selon l'horizon du temps :

- Perspective court terme : l'objectif de Kyoto actuel (-8 % pour 2008-2012) : Un coût marginal de **20 €₂₀₀₀/t CO₂** est adopté dans le projet UNITE et 19 €₂₀₀₀/t CO₂ selon une étude pour l'Allemagne (Fahl, 1999)¹¹.
- Perspective long terme :
 - Selon INFRAS (2004), pour atteindre les objectifs de réduction à *long terme* (- 50 % à l'échelle mondiale en 2030 par rapport à 1990¹²), le coût pour la société est de 135 €₂₀₀₀/ t de CO₂ (sur base des coûts d'évitement marginaux repris dans les études disponibles et relatives aux pays développés).
Selon Ari Rabl, cette valeur est surestimée, en raison de la non prise en compte des facteurs d'apprentissage et des évolutions technologiques.
 - Selon l'étude ExterneE (2005), les coûts de prévention pour un objectif de durabilité (stabilisation à +2°C de réchauffement climatique par rapport aux températures de la période préindustrielle) des objectifs plus ambitieux que Kyoto pourraient se chiffrer à **95 €₂₀₀₀/t**. L'étude suggère cependant qu'un tel coût (et donc une telle ambition de réduction) puisse ne pas être accepté par la population, et propose alors de considérer la valeur de **50 €₂₀₀₀/t** comme valeur acceptable.

II.2.4.1 Coût environnemental total

Les valeurs de coût environnemental retenues sont les suivantes :

Coût environnemental total			
GES concernés par un effort de limitation des émissions totales = ceux émis par les pays signataires			
Approche Prévention	Objectif Court terme -Kyoto	20 € ₂₀₀₀ - coût des impacts environnementaux de l'AEM	20 € ₂₀₀₇ / t CO ₂ eq
	Objectif Long terme - Durabilité CCNUCC 2°C – valeur basse	50 € ₂₀₀₀ - coût des impacts environnementaux de l'AEM	50 € ₂₀₀₇ / t CO ₂ eq
	Objectif Long terme - Durabilité CCNUCC 2°C –valeur haute	95 € ₂₀₀₀ - coût des impacts environnementaux de l'AEM	96 € ₂₀₀₇ / t CO ₂ eq

Tableau 1 : Valeur des coûts environnementaux totaux retenus pour les gaz à effet de serre

Comme seules des mesures destinées à atteindre les objectifs de Kyoto sont en place actuellement, c'est la valeur correspondant à **l'objectif de Kyoto qu'il convient d'adopter pour des études concernant des effets à moyen terme**. Pour des études concernant des effets à long terme, la valeur correspondant à l'objectif de durabilité semble plus indiquée.

II.2.4.2 Coût externe

Le coût externe dépend du degré d'internalisation des coûts environnementaux.

¹¹ Le prix actuel des droits d'émissions, très fluctuant, ne reflète pas fidèlement l'objectif Kyoto, le nombre de quotas distribués étant excessif par rapport à cet objectif.

¹² Selon Pielsbag, A. (2006), de tels objectifs, appliqués globalement, permettrait de se maintenir sous le seuil d'un réchauffement climatique de 2°C (Objectif durabilité CCNUCC).

Dans l'optique d'une modélisation conséquentielle, ce sont les effets environnementaux de l'émission d'une tonne supplémentaire de CO₂ qui sont examinés. Si cette tonne est visée par le système de quotas d'émissions, ses effets sont pris en compte par le marché à travers l'achat d'un droit supplémentaire d'émission (ou par la réduction supplémentaire d'une tonne ailleurs par le même agent)¹³. Le taux d'internalisation est donc de 100 % pour le CO₂ et le coût purement externe nul dans ce cas précis.

Par contre, pour les flux autres que CO₂ et pour les secteurs et pays non concernés par le système de quotas, il est considéré par défaut que les coûts des effets environnementaux ne sont pas pris en compte par le marché. En effet, aucun coût n'est à supporter suite l'émission de ces GES. Le taux d'internalisation est dès lors égal à 0 %.

En conclusion, on considèrera, dans le cas d'une approche conséquentielle, un taux d'internalisation de 100 % pour le CO₂ et de 0 % pour les autres GES.

Coût externe			
GES concernés par un effort de limitation des émissions totales = ceux émis par les pays signataires			
Approche Prévention	CO ₂		0 € ₂₀₀₇ / t CO ₂ eq
	Autres GES : Objectif Court terme - Kyoto	20 € ₂₀₀₀ - coût des impacts environnementaux de l'AEM	20 € ₂₀₀₇ / t CO ₂ eq
	Autres GES : Objectif Long terme - Durabilité CCNUCC 2°C – valeur basse	50 € ₂₀₀₀ - coût des impacts environnementaux de l'AEM	50 € ₂₀₀₇ / t CO ₂ eq
	Autres GES : Objectif Long terme - Durabilité CCNUCC 2°C – valeur haute	95 € ₂₀₀₀ - coût des impacts environnementaux de l'AEM	96 € ₂₀₀₇ / t CO ₂ eq

Tableau 2 : Valeur des coûts externes totaux retenus pour les gaz à effet de serre

En analyse de sensibilité, le cas d'une **internalisation totale pour tous secteurs et tous les GES** peut être étudié. Il correspondrait à une situation où en vue de l'atteinte stricte des objectifs de réduction (par exemple Kyoto), la pression exercée sur les émissions de CO₂ des secteurs concernés par l'allocation des quotas se répercuterait sur l'ensemble des GES dans les pays engagés dans un effort de limitation des émissions totales.

De même, le cas d'une **internalisation nulle pour tous secteurs et tous les GES** peut aussi être étudié. Il correspondrait à une situation où les accords ne sont pas respectés et que les émissions dépassent les quotas sans réaction forte des Autorités pour empêcher le dépassement.

Dans les deux cas, le coût associé aux différents GES est extrapolé sur base du coût du CO₂ et des facteurs de classification IPCC 100 ans.

II.2.5. Facteur de monétarisation pour la consommation de ressources énergétiques non renouvelable

Suite à leur consommation continue, les ressources non renouvelables seront un jour épuisées. Les effets conséquents ressentis par la société sont fonction de l'attitude adoptée face à cet épuisement.

¹³ En effet, les systèmes d'échange de quotas permettent l'internalisation des effets environnementaux. Cf. Javier de Cendra de Larragán. *Emissions trading and equal competition*. 5 April 2005 <http://www.unimaas.nl/bestand.asp?id=5078>

Dans le cas de notre étude, et au regard d'un certain nombre de sources de la littérature¹⁴, il apparaît que, techniquement, il devrait être possible de satisfaire la demande future au moyen des énergies renouvelables dont nous disposons actuellement (hydroélectrique, biomasse, solaire, éolien, géothermique). Nous considérons donc comme réponse de la société à l'épuisement des ressources énergétiques non renouvelables le développement des voies alternatives de production énergétique, avec une intensité telle que la production globale d'énergie suffira à répondre aux besoins.

En conséquence, **la société ne subit pas le dommage lié à un moindre accès à la commodité énergétique, mais subit les effets de la réaction qu'elle a adoptée.**

Les effets à attribuer à la consommation de ressources énergétiques sont les différentiels d'impacts environnementaux, économiques et sociaux entre l'activité de production d'énergie au départ de sources renouvelables et l'activité économique moyenne abandonnée en contrepartie. L'activité moyenne de production d'énergie renouvelable est spécialement peu impactante du point de vue environnemental. Son profil d'impact environnemental est donc fortement différent de celui de l'activité économique moyenne abandonnée. Le facteur de monétarisation lié à l'épuisement des ressources énergétiques non renouvelables est donc composé du coût de l'activité de production d'énergie au départ de sources renouvelables, et du delta d'impact environnemental monétarisé entre cette activité (considéré comme négligeable) et l'activité économique moyenne.

II.2.5.1 Coût environnemental total

L'étude méthodologique conduite par CPM (CPM 1999, méthodologie 'EPS') est exploitée pour l'établissement du coût de l'activité de production d'énergie au départ de sources renouvelables. Elle indique la nature des substituts renouvelables sur base de leurs applications respectives :

Ressource	% de la production énergétique fossile totale	Application	Substitut
Charbon	3%	Carbone pour industrie (9%)	Charbon de bois
	26%	Energétique (91%)	Eolien, hydro-électrique, solaire
Gaz	28%	Toutes	Bio-gaz
Pétrole	21%	Carburant (50%)	Huile végétale (réf=colza)
	21%	Energétique (50%)	Eolien, hydro-électrique, solaire

Tableau 3 : Nature des substitution aux énergies fossiles considérées pour le calcul du facteur de monétarisation « consommation de ressources »

Cette étude renseigne également les coûts de production de l'énergie au départ du charbon de bois, du biogaz et du bio-diesel. Les coûts de production d'électricité par éolien, hydraulique et solaire, la valeur " hypothèse RDC" est estimée grossièrement sur base de valeurs collectées dans diverses sources.

L'établissement du coût environnemental de l'activité économique moyenne est expliqué dans le détail au chapitre I.3.1.4. (page 42) du guide sur la monétarisation des impacts environnementaux du recyclage.

¹⁴ WEA (2000), Johansson (2004), Ted Trainer (2004)

Le facteur de monétarisation calculé est donc de 0,015 €₂₀₀₇/MJ primaire. Notons que la valeur des coûts de production est une donnée entachée d'une incertitude non négligeable, fonction des projections d'évolution technologique (le coût futur est d'autant moindre qu'il y a des phénomènes d'apprentissage et d'innovation, mais il peut être supérieur s'il y a apparition de nouvelles contraintes).

De ce fait, nous ferons varier la valeur de ce facteur de -20 % à + 20 %.

II.2.5.2 Coût environnemental externe

Le prix du pétrole brut est considéré comme la seule forme d'internalisation de coûts causés par l'épuisement des ressources énergétiques non renouvelables (hypothèse que le coût d'exploitation d'un gisement est négligeable par rapport au coût de la ressource). Il est calculé par extrapolation à la période de début 2007 de la tendance des cinq dernières années. Le prix en €₂₀₀₇ est basé sur une valeur extrapolée de 64 \$ par baril.

Le taux d'internalisation pour l'ensemble de cette catégorie d'effet est le rapport entre ce prix et le coût environnemental total (valeurs exprimées en €₂₀₀₇/kg de pétrole brut). Il vaut 53 % et est appliqué aux autres types de ressources énergétiques.

Remarque :

Compte tenu des importantes fluctuations récentes du prix du baril de ces derniers mois, il nous a semblé judicieux de tester la sensibilité des résultats à un prix du baril plus élevé. Les valeurs de 100 \$ (valeur en Septembre 2008) et 150 \$ ont été testées.

On obtient ainsi les taux d'internalisation suivants :

Valeur FM (€/MJ)	Prix baril pétrole (\$)		
	64	100	150
0.012	65 %	102 %	153 %
0.015	53 %	83 %	124 %
0.018	43 %	68 %	102 %

Tableau 4 : Taux d'internalisation calculés selon le prix du baril du pétrole et la valeur du facteur de monétarisation

Note : Si le taux d'internalisation calculé devient supérieur à 100 %, c'est le cas pour la valeur de 150 \$ le baril pour toutes les valeurs du FM et pour la valeur de 100 \$ le baril avec un FM de 0,012 € / MJ, il est alors plafonné à 100 %.

II.2.6. Facteur de monétarisation pour les nuisances

La définition retenue dans le guide de monétarisation considère les « nuisances » comme étant les impacts locaux d'une activité générant des réactions négatives de la part de la population située dans le voisinage immédiat du lieu où l'activité se produit, hors impacts directs sur la santé humaine. Ainsi, les nuisances résultent le plus souvent des phénomènes de bruit, d'odeur, d'intrusion visuelle ou d'un sentiment accru de risque (par exemple suite à la présence de déchets).

Dans le cadre du Guide de monétarisation, des facteurs de monétarisation avaient été calculés pour les sites industriels de gestion de déchets et pour les transports.

La présente étude n'a appliqué ces facteurs que de façon partielle, pour les raisons suivantes :

- Dans le cas des sites industriels de gestion de déchets, il aurait été incohérent de considérer les nuisances liées à celles des incinérateurs ou des CSDU mais de ne pas prendre en compte celles liées aux sites de recyclage. En effet, ces sites peuvent engendrer des nuisances non négligeables (en particulier olfactives et auditives).
- Dans le cas des transports, les nuisances ont été prises en compte lorsqu'il était possible de le faire de manière cohérente, c'est-à-dire lorsque les transports peuvent être pris en compte de manière similaire pour le scénario recyclage et le scénario fin de vie alternative et production à partir de matière vierge :
 - Concernant le recyclage des papiers/cartons, les distances et les moyens de transport sont précisés pour l'acheminement des PCR jusqu'aux usines de recyclage ainsi que pour l'approvisionnement en bois des papeteries travaillant à partir de bois. À l'inverse, les distances de transport des composés chimiques entrant dans les procédés de recyclage ou de production à partir de bois ne sont pas connues (impacts intégrés dans les LCI utilisés) et leurs nuisances ne peuvent donc être calculées. L'intégration des nuisances liées aux transports est donc réalisée.
 - Le recyclage des plastiques n'a pas présenté une même opportunité d'application. La production évitée de matière vierge est modélisée sur base de procédés issus de la base de données de PlasticsEurope. Or la description de ceux-ci n'explicite pas l'aspect transport des matières premières entrant dans la fabrication du plastique.

Considérer les nuisances des transports de la filière recyclage tout en ignorant celles liées à la production à partir de matière vierge aurait donc biaisé les résultats aux dépens du recyclage. Ces nuisances ne sont donc pas prises en compte dans la modélisation du recyclage des plastiques.

Les nuisances prises en compte dans le modèle sont donc :

- dans le cas des papiers/cartons, les seules nuisances liées aux transports, en particulier :
 - o les transports entre le centre de tri et l'usine de recyclage
 - o les transports nécessaires à l'approvisionnement en bois des usines de pâte à papier
- dans le cas des plastiques, aucune nuisance n'a été prise en compte.

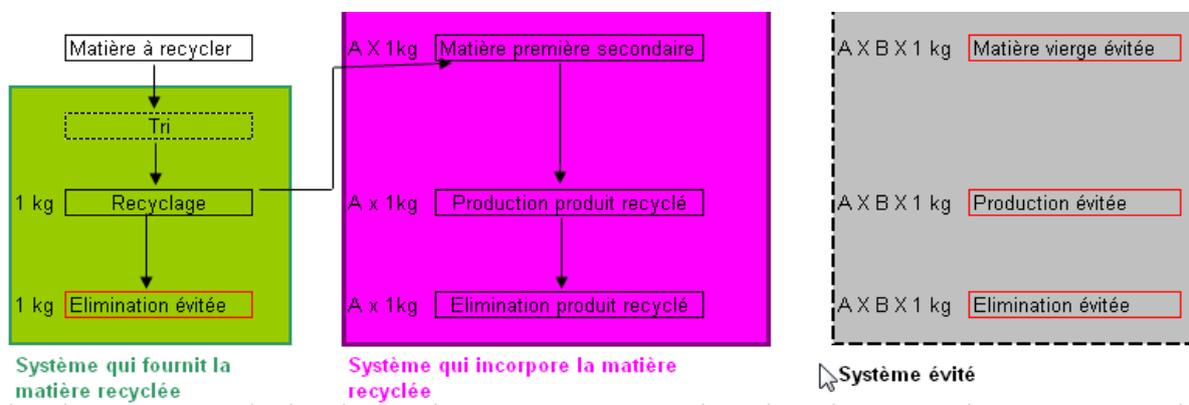
III. Points méthodologiques spécifiques aux études de cas considérées

III.1 Champ de l'étude

Le champ de l'étude va de la sortie du centre de tri à l'élimination finale du déchet¹⁵.

L'étude considère la mise en œuvre du recyclage après une étape de tri préliminaire, qui permet d'avoir un flux de plastiques ou de papiers cartons séparé d'une bonne partie des déchets pouvant être collectés en mélange (cas des collectes sélectives multi-matériaux) ou d'impuretés.

Les transports en amont du centre de tri ne sont pas pris en compte. L'étude ne prend donc pas en compte, d'une part, la collecte sélective et le transport vers le centre de tri lors du scénario de recyclage et, d'autre part, la collecte et le transport vers les installations d'élimination (incinérateurs et décharge) pour la fin de vie évitée.



A : rendement de recyclage ; B : taux de substitution

Figure 1 : Périmètre de l'étude

Le système étudié démarre au recyclage d'une tonne de produit. Aussi, on considérera :

- les déchets depuis la sortie du centre tri jusqu'à leur élimination finale pour les produits pouvant être contenus dans des collectes sélectives de déchets ménagers¹⁶ ;
- les déchets entrant dans les installations de recyclage après une collecte sélective, voire un tri préalable qui peut se faire sur le site de recyclage (cas du PVC ou de l'ABS par exemple).

Les conséquences de ce recyclage sont :

- L'évitement de la fin de vie de la matière à recycler ;
- La production d'une matière première secondaire, au taux de recyclage près, qui rentre dans un cycle de production et finit en fin de vie.

Cette fin de vie peut être différente, selon l'application retenue, de la fin de vie évitée de la matière à recycler.

¹⁵ D'après d'autres études que nous avons réalisées, l'impact de la collecte sélective et du centre de tri ne représentait pas plus de 10 % en valeur absolue par rapport au bénéfice environnemental du recyclage.

¹⁶ Cas des Papiers cartons, du PET, PEHD, PEBD, voire PS thermoformé.

Note : dans la première itération, nous avons fait l'approximation que la fin de vie évitée et la fin de vie de la matière secondaire étaient les mêmes. Cela sera modifié pour la 2ème itération, le cas échéant.

- L'évitement de tout un cycle de production et d'élimination à partir de matière vierge, au taux de substitution près.

Pratiquement, cela signifie que l'étude ne considère pas d'efficacité du procédé de tri (perte de matière recyclable lors du tri), mais prend en compte l'efficacité du procédé de recyclage (perte de matière recyclable lors du recyclage).

Remarque :

Cette étude considère l'impact d'une boucle de recyclage. Les boucles de recyclage ne viennent pas en tant que tel modifier la modélisation. En effet, même si le papier ou les plastiques peuvent être recyclés plusieurs fois, on aboutit in fine à une économie de matière vierge.

III.2 Mix électrique

Un mix électrique représente l'ensemble des moyens de production d'électricité qui seront utilisés pour satisfaire la demande d'un kWh d'énergie électrique. La définition de ce mix électrique détermine les impacts environnementaux associés à une consommation d'électricité.

Le raisonnement le plus simple considère que chaque moyen participera à la production proportionnellement à la place qu'il occupe dans la génération d'électricité à l'échelle nationale, dans un pays donné. Cette approche (appelée **approche moyenne**) permet de déterminer le **mix moyen**.

Cependant cette méthode ne permet pas de rendre compte de la complexité des cas réels. En effet, elle ne modélise pas un lien de cause à effet entre une variation de la consommation et la mise en fonctionnement ou l'arrêt de centrales supplémentaires : elle réalise seulement une allocation moyenne correspondant à une réalité statistique.

Ces liens peuvent être de deux types :

- A court terme, les gestionnaires du réseau ne peuvent installer de nouvelles capacités (c'est à dire construire des centrales) : ils vont donc utiliser davantage des moyens de production existants, qui ne sont pas déjà utilisés au maximum. Ce sont alors ces centrales (appelées les moyens marginaux) qui composent le mix électrique de court terme.
- A long terme, les gestionnaires du réseau peuvent décider de construire de nouvelles centrales de production d'électricité.

Dans les deux cas, c'est une relation de cause à effet entre une consommation et une production d'électricité qui est étudiée. C'est pourquoi le mix électrique déterminé par cette méthodologie est appelé le **mix conséquentiel**. Il peut aussi être appelé le mix basé sur le marché, ou encore le mix marginal¹⁷.

Le mix conséquentiel de long terme est adapté aux décisions qui auront un effet structurel durable sur la consommation d'électricité (exemple : la décision de développer davantage le transport ferroviaire impliquera un accroissement de la consommation d'électricité pendant des décennies pour alimenter le trafic).

Ces mix sont calculés à partir des projections d'évolutions de la production et de la consommation d'énergie réalisées par les bureaux compétents des différents pays. La part des différents moyens dans le mix de long terme représente leur part dans les investissements à venir.

¹⁷ L'appellation "conséquentielle" est préférée car elle est sans équivoque.

Dans cette étude, nous utiliserons tant que possible le mix consécutif de long terme adapté au pays de production de l'électricité.

III.3 Limites de l'approche

III.3.1. Evolution dynamique du marché

La situation de marché analysée fait état de notre connaissance de la situation actuelle des marchés. Cependant, la situation de marché n'est pas immuable ; il peut évoluer, tout comme les technologies. De nouveaux débouchés peuvent alors voir le jour, qui viendront absorber les nouveaux flux de matière à recycler. La vérité d'un jour n'est donc pas forcément celle du lendemain. C'est pourquoi nous donnons dans les analyses spécifiques des commentaires sur :

- l'incertitude des connaissances sur la situation actuelle des marchés
- le degré de stabilité de la situation et les tendances possibles, voire probables.

III.3.2. Manque de consensus sur les facteurs de monétarisation

La monétarisation des résultats permet de comparer les impacts environnementaux avec les investissements à effectuer. Les deux choses à comparer seront exprimés en €.

La monétarisation des résultats de l'analyse environnementale consiste en la traduction des impacts environnementaux en impacts financiers sur la société.

L'ensemble des contributions est alors exprimé en termes monétaires, correspondant à l'estimation financière des dégâts causés. Ceci se fait à l'aide de facteurs de monétarisation. Même si les valeurs absolues des facteurs de monétarisation sont très variables selon les hypothèses de calcul (provenant de différentes sources), la hiérarchisation des catégories d'impacts reste stable, en raison notamment de l'importance relative forte de la consommation des ressources naturelles.

La méthode de monétarisation est appliquée de façon prudente. Elle agit comme un filtre qui permet d'éliminer de la discussion les impacts négligeables et de centrer ainsi la discussion/évaluation des résultats sur les impacts et sources d'impacts principaux.

IV. Recyclage des papiers/cartons

IV.1 Contexte

La collecte et le recyclage des papiers/cartons (ou PC) est une pratique qui s'est d'abord développée de façon interne, les producteurs recyclant leur chutes de production et de transformation. Ce système s'est étendu à la collecte des déchets de papiers post-consommateur suite à la loi du 15 juillet 1975. Le développement de ces collectes sélectives, visant ménages et industriels, a permis d'atteindre en 2006 un taux de récupération de 63,7 %.

IV.2 Hypothèses de modélisation

IV.2.1. Champ de l'étude

L'étude considère les déchets à la sortie du centre de tri, jusqu'à leur élimination finale. Pratiquement, cela signifie que l'étude ne considère pas l'efficacité du procédé de tri (perte de matière recyclable lors du tri), mais prend en compte l'efficacité du procédé de recyclage (perte de matière lors du recyclage).

Remarque

Il ne faut pas confondre l'efficacité du recyclage et le taux de substitution de matière vierge par de la matière recyclée. Le taux de substitution est le rapport entre la quantité de matière vierge remplacée et la quantité de matière recyclée nécessaire pour la remplacer. Il dépend de la différence de qualité entre le vierge et le recyclé.

L'étude considère les étapes représentées dans la figure ci-dessous. Le recyclage s'arrête au stade de la pâte à papier, mais ne comporte pas la phase de séchage et de mise en forme.

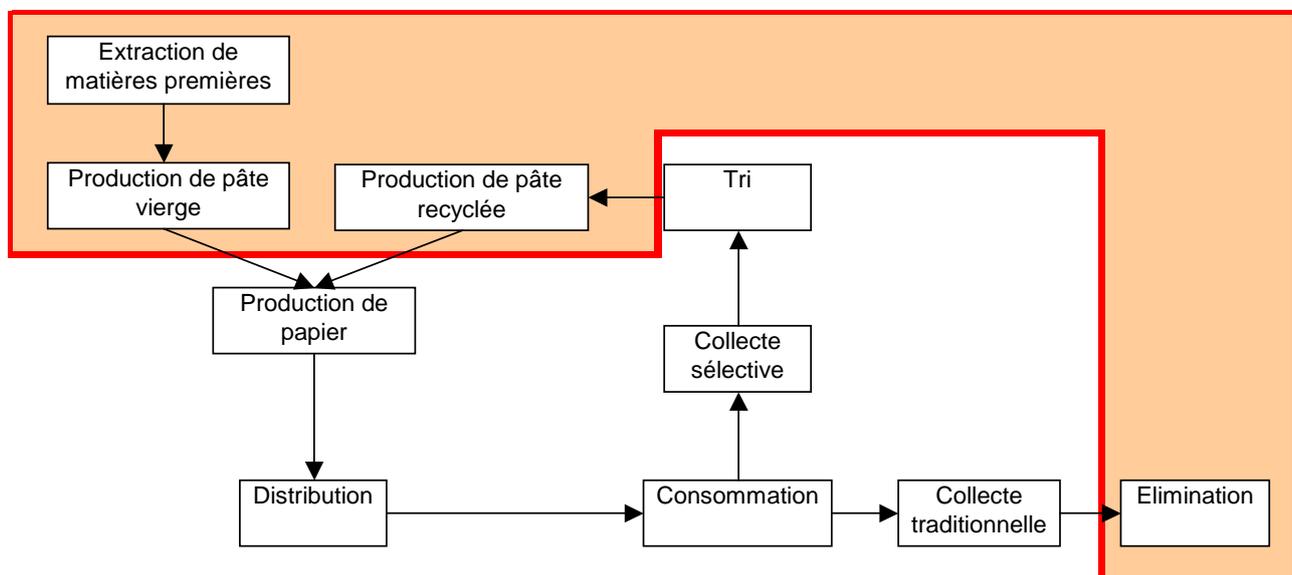


Figure 2 : Champ de l'étude pour les papiers / cartons

Ces limites de système favorisent légèrement les papiers et cartons produits à partir de matière vierge. En effet, toutes les usines de recyclage sont des usines dites intégrées, c'est-à-dire où la pâte à papier (produite à base des papiers/cartons récupérés ou PCR) est directement transformée. À l'inverse, la production de papier vierge peut être réalisée soit dans des usines intégrées, qui reçoivent du bois et transforment celui-ci en papier, soit des usines

séparées ; dans ce 2^e cas, le bois est d’abord transformé en pâte à papier et séché puis il est transformé en papier ultérieurement sur un autre site.

La production de papier en usines non intégrées engendre donc une phase de séchage supplémentaire (séchage de la pâte) ainsi que des transports. Ceux-ci n’ont pas lieu dans le cas du papier recyclé.

IV.2.2. Limites de l’étude

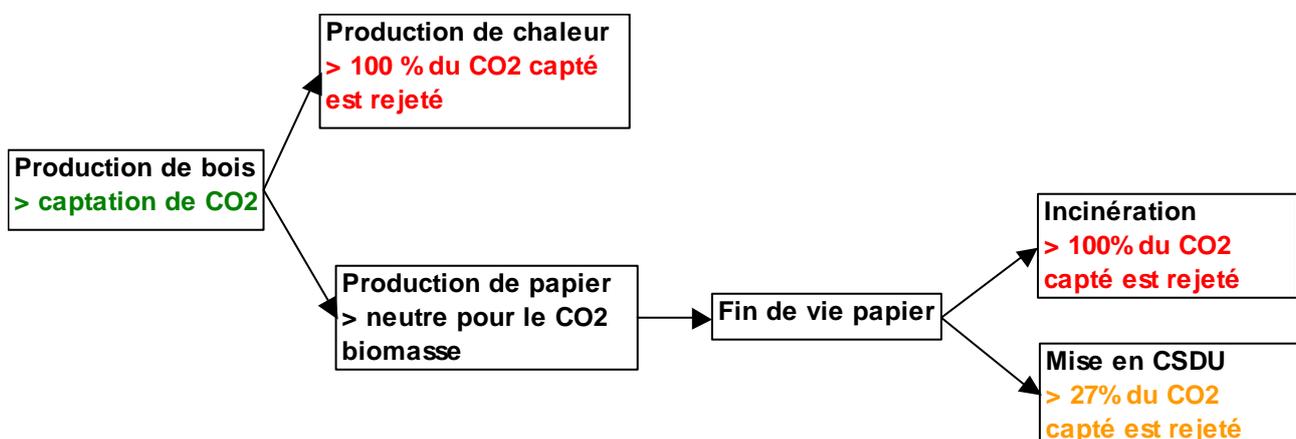
- Les cas étudiés correspondent à l’utilisation d’un type précis de PCR pour la production d’un type précis de papier recyclé. Ces résultats ne sont pas extrapolables à l’ensemble de la filière papier.
- La prise en compte de la production de pâte à papier et non de papier a pour conséquence de sous-estimer les nuisances liées aux transports pour la production de papier vierge :
 - Les usines de recyclage sont des usines intégrées où le papier est produit sur place. Dans le cas de papier vierge, la production peut se faire soit dans des usines intégrées (consommant du bois et produisant du papier), soit dans deux usines distinctes, la première consommant du bois et produisant de pâte à papier séchée et la seconde produisant du papier à partir de pâte à papier. Le fait de considérer une production de pâte à papier dans les deux cas ne prend pas en compte les surconsommations liées au séchage de la pâte à papier vierge dans le cas d’une production via deux usines distinctes
 - le papier recyclé parcourt généralement de moins longues distances entre l’usine de recyclage et les lieux de consommation que la papier vierge entre la papeterie et ces lieux de consommation.
- Les seules nuisances considérées sont celles liées aux transports, en particulier :
 - les transports entre le centre de tri et l’usine de recyclage
 - les transports nécessaires à l’approvisionnement en bois des usines de pâte à papier
 - Les nuisances liées aux sites de production (odeurs, bruit, ...) ne sont pas prises en compte.

IV.2.3. Prise en compte du carbone biogénique

Le coût environnemental total intègre les coûts des émissions de gaz à effet de serre, dont celles de carbone biogénique.

Dans le modèle, la captation de CO₂ de l’air par la biomasse est prise en compte, de même que les émissions lors de l’incinération du bois ou du papier.

Cette prise en compte peut se résumer par la figure ci-dessous.



Ainsi, en analysant un cycle de vie complet on obtient les situations suivantes :

- Lorsque le bois est utilisé en production de chaleur, le cycle du carbone biogénique est neutre
- Lorsque le bois est utilisé pour produire du papier :
 - son cycle est neutre si le papier est incinéré
 - il constitue un puit de carbone biogénique si le papier est mis en CSDU, celui-ci ne se dégradant qu'à hauteur de 27 %

Lorsque le bois n'est pas utilisé, la croissance des arbres est considérée comme nulle. En effet, la croissance des arbres arrivés à maturité (et donc leur captation de CO₂) est négligeable au regard de celle des forêts exploitées.

IV.2.4. Unité fonctionnelle

IV.2.4.1 Définition générale

L'unité fonctionnelle modélisée est le recyclage d'une tonne supplémentaire de papiers/cartons en France.

Cette unité fonctionnelle est considérée pour quatre cas différents :

- Recyclage d'une tonne de boîtes cartonnées (type boîte de céréales) provenant des ménages
- Recyclage d'une tonne de journaux issus des ménages
- Recyclage d'une tonne de carton ondulé (carton bruns utilisés par les entreprises et les commerces) issu des commerces
- Recyclage d'une tonne de papier d'impression de bureaux

IV.2.4.2 Définition précise

Le terme "papiers/cartons" regroupe une grande variété de produits présentant des caractéristiques ou qualités différentes. Plusieurs nomenclatures existent pour classer ces différents papiers/cartons.

A. Nomenclature EN 643

Afin de faciliter les transactions entre membres de l'industrie papetière, ceux-ci ont mis en place une nomenclature permettant de définir la qualité des papiers récupérés.

Ainsi, le comité Européen de Normalisation (CEN) a adopté en novembre 2003 la norme « EN 643 – *The European List of Standard Grades of Recovered Paper and Board* », permettant la définition précise de la qualité des papiers récupérés. Ceux-ci sont définis en fonction des possibilités qu'ils présentent en recyclage (flux pur ou mélangé, fortement imprimé ou non, ...).

Les papiers récupérés sont alors définis en 5 groupes (*ordinary grade, medium grade, high grade, kraft grade, special grade*), dont chacun d'eux est divisé en une dizaine de sous-groupes.

B. Nomenclature du CEPI

Les statistiques fournies par le CEPI (*Confederation of European Paper Industries*) sont données dans une nomenclature simplifiée, partiellement basée sur la nomenclature EN 643. La nomenclature du CEPI considère quatre qualités de papier récupéré :

- Papiers mélangés
- Journaux et magazines

- Carton ondulé
- Qualité supérieure

Chacune de ces catégories est définie sur base de la nomenclature EN 643, mais les groupements ne sont pas réalisés de manière similaire. À titre d'exemple, la catégorie Qualité supérieure (*high grade*) telle que définie par le CEPI comporte des qualités de papiers provenant des *medium grade*, des *high grade* et des *special grade* de la nomenclature EN 643.

C. Qualités de papier étudiées

Cette étude définit quatre catégories de papiers récupérés (ou PR) sur base de leur qualité et de leur origine. Les quatre niveaux de qualité considérés correspondent aux catégories définies par le CEPI.

La définition des papiers récupérés étudiés est donnée dans le tableau ci-dessous avec leur correspondance dans les différentes nomenclatures.

Étude RDC	Nomenclature EN 643	CEPI grade
Cartons provenant de boîtes de céréales des ménages	1.03	<i>Mixed grade</i>
Journaux des ménages	1.08 / 1.09 / 1.10	<i>Newspapers & magazines</i>
Papiers d'impression de bureaux triés	2.05	<i>High grade</i>
Cartons ondulés de commerces	1.04 / 1.05 / 4.02 / 4.03	<i>Corrugated and kraft</i>

Tableau 5 : Définition des papiers étudiés suivant les différentes nomenclatures

IV.2.5. État des marchés concernés

L'étude de l'état des marchés doit permettre de répondre aux questions :

- Dans quelle(s) filière(s) les PCR seront utilisés ?
- Quelles substitutions ont lieu ? (Quels sont les taux de substitution qui en découlent ?)

IV.2.5.1 Le papier recyclé

Le marché du papier est un marché mondial, tout comme les marchés des différents composants entrant dans la production de celui-ci (bois, papiers récupérés). À titre d'exemple, le Tableau 6 ci-dessous présente les flux commerciaux de papiers/cartons récupérés (PCR) entre les pays du CEPI¹⁸ et les différentes régions du monde en 2006.

¹⁸ Les pays membres du CEPI en 2006 sont : Allemagne, Autriche, Belgique, Espagne, Finlande, France, Hongrie, Italie, Norvège, Pays-Bas, Pologne, Portugal, République Tchèque, Royaume-Uni, Slovaquie, Suède, Suisse.

<i>Flux de PCR pour l'année 2006 en ktonne</i>			
Régions du monde	Utilisation de PCR dans les pays du CEPI	Imports de PCR dans les pays du CEPI	Exports de PCR vers les autres régions du monde
Autres pays européens	48 916	762	340
Amérique du Nord		230	24
Amérique Latine		8	1
Asie		0	7 655
Reste du monde		6	180
Total	48 916	1 006	8 200

Tableau 6 : Flux commerciaux de PCR dans les pays du CEPI en 2006¹⁹

Selon le CEPI, la demande en PCR est très forte pour l'ensemble des flux. Le marché des PCR est en déficit de matière (l'offre est inférieure à la demande) et le restera à moyen terme, excepté en cas de crise économique majeure. En effet, les grandes tendances d'évolution des marchés du papier semblent indiquer une croissance soutenue de la demande en PCR. La figure ci-dessous illustre les prévisions concernant l'utilisation de PCR (ou *recovered paper*) dans la production mondiale de papier : l'augmentation de la production de papier s'appuie majoritairement sur les PCR, ce qui implique donc une forte augmentation de la demande en PCR.

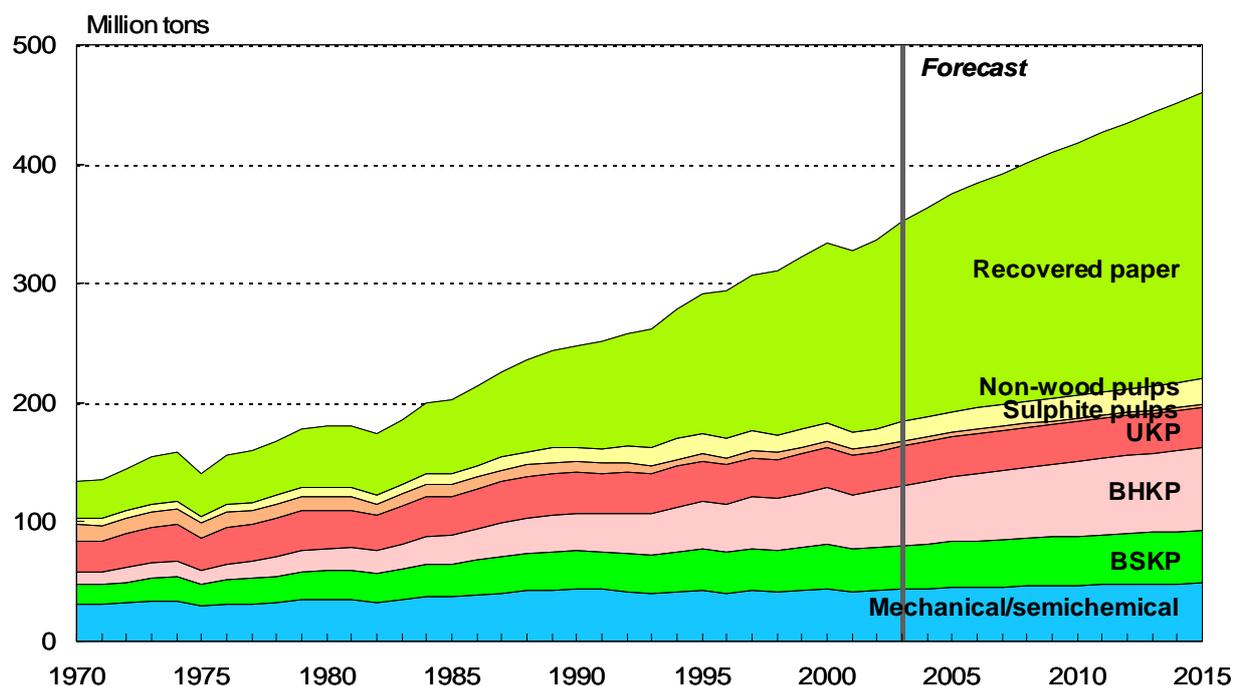


Figure 3 : Prévisions de l'évolution des consommations mondiales de fibres pour la production de papier

Source : « Trends and Developments in the Chinese Pulp and Paper Industry », réalisée en 2004 par Jaakko Pöyry Consulting

¹⁹ Source : Confederation of European Paper Industries (CEPI) – Keys statistics 2006

Cette figure indique les tendances suivantes :

- Une légère augmentation de l'ensemble des productions de fibres vierges :
 - Les pâtes mécaniques, en bleu sur la figure (mechanical/semichemical)
 - Les pâtes chimiques :
 - La pâte kraft à base de résineux, en vert : BKSP (Bleached softwood kraft pulp)
 - La pâte kraft écrue, en rose foncé : UKP (Unbleached kraft pulp)
 - Les pâtes à base d'autres matériaux, en jaune sur la figure (Non-wood pulps)
- Une augmentation plus importante de la production de pâte kraft à base de feuillus (pâte chimique), en rose pâle : BHKP (Bleached Hardwood Kraft Pulp)
- Une forte augmentation de l'utilisation de papiers récupérés, en vert sur la figure (Recovered paper)
- Une diminution de la production de pâte à papier à base de sulphite (pâte chimique) en marron dans la figure (Sulphite pulps)

Les deux principaux leviers de cette tendance sont :

1) Les besoins de PCR grandissant de l'Asie, en particulier de la Chine

Les marchés mondiaux actuels sont caractérisés par de forts exports de PCR vers la Chine, faisant de la Chine un importateur net de PCR. On y observe un décalage entre la forte consommation de PCR pour la production de papier et la faible collecte de PCR (fin de vie). Cela s'explique principalement par les exports importants de produits depuis l'Asie. En effet, les produits exportés sont généralement emballés dans du carton. Une quantité importante de carton quitte donc ces pays sous forme d'emballages et n'y est donc plus "collectable". Un taux de collecte du papiers/carton calculé sur la base de la production de Papier/Carton a donc peu de sens et sous-évalue la collecte réelle.

À l'inverse, les pays du CEPI disposent d'un gisement de carton collectable qui n'entre pas en compte dans les données de production, ce qui a pour conséquence de surévaluer le taux de collecte sélective.

Ce phénomène est illustré dans la Figure 4 ci-dessous.

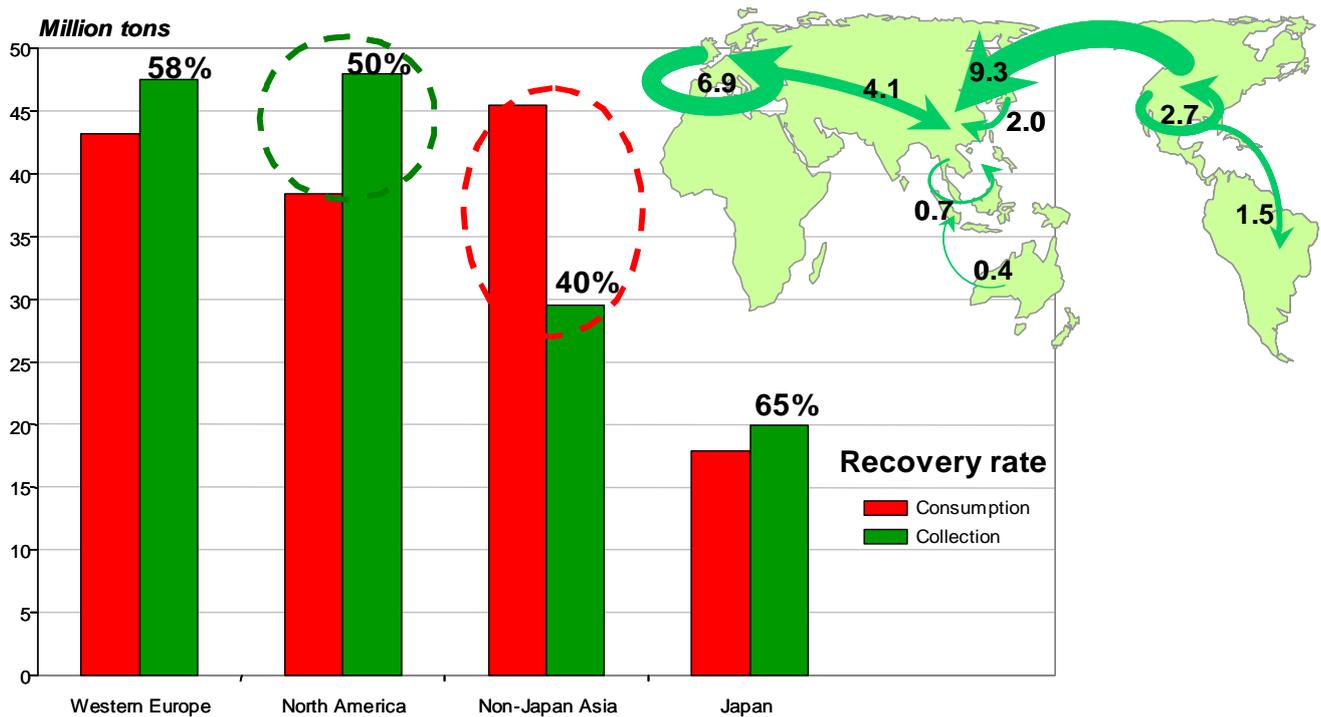


Figure 4 : PCR collectés et consommés dans les différentes régions du monde²⁰

Cette figure doit se lire de la manière suivante :

- Les diagrammes rouges représentent la consommation de PCR en millions de tonnes
- Les diagrammes verts représentent la collecte de PCR en millions de tonnes
- Les pourcentages représentent le taux de collecte sélective des PCR

En terme de qualité de PCR, il n'y a pas de différence significative entre les PCR consommés dans les pays du CEPI et ceux consommés en Chine.

2) la croissance de la demande en PCR en Europe

Bien que moins vigoureuse que la croissance de la demande de PCR en Asie, la production de papier et donc la demande en PCR dans les pays du CEPI présentent une croissance relativement stable, autour de 2 %.

²⁰ Source : Trends and Development in the Chinese Pulp and Paper Industry – Jaakko Pöyry (année 2003)

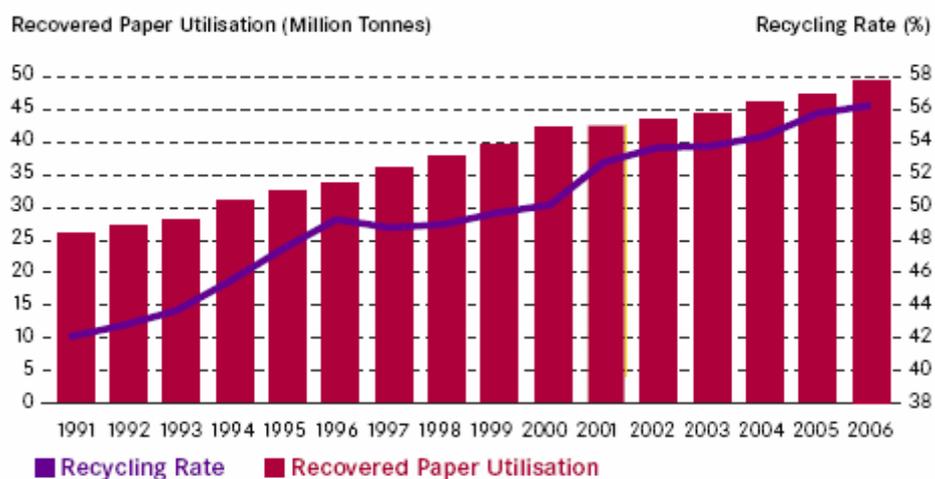


Figure 5 : évolution des quantités de PCR utilisées

Conséquence en terme de modélisation :

→ La demande en PCR est importante et le marché ne risque pas la saturation (offre supérieure à la demande). Les PCR collectés sont donc valorisés en tant que ressource dans la filière papier (filière de valorisation à haute valeur ajoutée pour les PCR). **La ressource naturelle remplacée est donc le bois**

IV.2.5.2 Le bois

L'utilisation de PCR lors de la production de papier est en concurrence avec une utilisation de pâte vierge, et donc avec une utilisation de bois. En d'autres termes, le recyclage du papier permet une diminution des consommations de bois. L'approche conséquentielle consiste à investiguer quelle est la conséquence de la non-utilisation de ce bois. Cette question trouve sa réponse dans l'examen de l'état des marchés du bois.

A. Situation actuelle

Les données utilisées sont basées sur le rapport « *Revue annuelle du marché des produits forestiers 2006-2007* » réalisé conjointement par la Commission économique pour l'Europe des Nations Unies (UNECE) et par l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO).

La situation actuelle correspond à une pénurie de bois sur les marchés (la demande excède l'offre). Cette situation se traduit concrètement par des prix élevés du bois.

Cet état des choses ne semble néanmoins pas lié à une limitation des ressources de bois sur pied. En effet, en Europe, les volumes de bois abattus annuellement restent nettement inférieurs à l'accroissement des forêts.

Statistiques des forêts de l'Union Européenne et de l'AELE (Association Européenne de Libre Échange) pour l'année 2000	
Stock de bois total	16,2 milliards de m ³
Accroissement annuel du volume de bois	515 millions de m ³
Volume total de bois abattu annuellement	348,5 millions de m ³
Volume de bois abattu extrait des forêts	260 millions de m ³
Volume abattu / accroissement annuel	68%

Figure 6 : Statistiques forestières en Europe

Source : "Mobilizing wood resources : can Europe's forests satisfy the increasing demand for raw material and energy under sustainable forest management ?", UNECE & FAO

Ce tableau indique un taux d'abattage du bois de 68 %, ce qui correspond à un accroissement net (après abattage) de 157 millions de m³ de bois par an.

Les tensions sur les marchés du bois empêchent une production de bois plus importante. Elles semblent essentiellement liées,

- à court et moyen termes, à des problèmes d'infrastructure et d'équipement,
- à long terme, aux risques économiques des investissements correspondants.

Remarque

Les problèmes relatifs à la déforestation dans certaines régions du monde (Amazonie, Afrique) sont généralement la conséquence de transformations de forêts en terres agricoles ou en utilisation du bois pour le chauffage des habitants locaux. Ces besoins ne sont pas régis par un cours mondial du bois et ne sont donc pas liés à la consommation de bois des industries papetières.

B. Évolution du marché du bois

Les projections²¹ concernant l'équilibre futur entre l'offre et la demande en bois sont très variables ; ces projections consistent d'ailleurs en une série de scénarios. Tous les scénarios tablent sur une augmentation de la demande et de l'offre en bois, mais, alors que certains scénarios font l'hypothèse d'une croissance plus forte de la demande, d'autres supposent une croissance plus importante de l'offre.

Les facteurs sur lesquels se basent une prévision d'augmentation de la demande sont :

- Une croissance stable de la demande en bois pour des utilisations « classiques »²² des pays développés (2 %)
- Une croissance vigoureuse de la demande en bois pour des utilisations « classiques » des pays en développement (notamment en Asie). La croissance économique des pays d'Asie devrait se traduire en une augmentation de la consommation de produits manufacturés à base de bois.
- Le développement de la filière bois-énergie : l'Europe a défini des objectifs à l'horizon 2020 concernant la production d'énergies renouvelables. Ces objectifs sont élevés et nécessitent de faire appel à un ensemble de mesures et de technologies variées pour y parvenir, notamment à la filière bois-énergie.

²¹ European Forest Sector Outlook Study, UN, 2005

Mobilizing wood resources : Can Europe's Forests satisfy the increasing demand for raw material and energy under sustainable forest management ?, UN, 2007

²² Construction, meubles, papeterie

Parallèlement à la croissance de la demande, des prix élevés permettront une augmentation de l'offre en bois, les possibilités à ce niveau étant :

- Un taux plus élevé d'abattage (actuellement : abattage/accroissement annuel du volume de bois = 68 % en UE)
- La valorisation des coupes d'éclaircissement et de nettoyage
- La mise en place de plantations de forêts à révolution courte (essence ayant une forte croissance). Il s'agit de considérer le bois comme un produit agricole, au même titre que les céréales par exemple, qui est planté et récolté régulièrement.

La question est ensuite : quel sera l'équilibre entre l'offre et la demande, autrement, l'augmentation de capacité permettra-t-elle de répondre à l'accroissement de la demande ?

Ainsi, plusieurs scénarios peuvent être envisagés :

1. La demande en bois restera inférieure à l'offre : la ressource n'est pas limitée

Les forêts ne sont pas exploitées à leur maximum et ne le seront pas dans le futur. La ressource n'est donc pas limitée à un niveau engendrant une concurrence accrue pour l'accès à cette ressource entre les secteurs économiques.

Une telle situation provient du fait que la production peut augmenter encore fortement et/ou que la demande ne va pas augmenter de manière considérable ; la demande ne va pas augmenter au-delà de l'offre.

Sur base de ce scénario, le bois non-utilisé grâce au recyclage du papier n'est pas valorisé dans une autre filière économique et reste sur pied. La consommation de bois des autres filières économiques reste indépendante de la consommation de bois de l'industrie papetière.

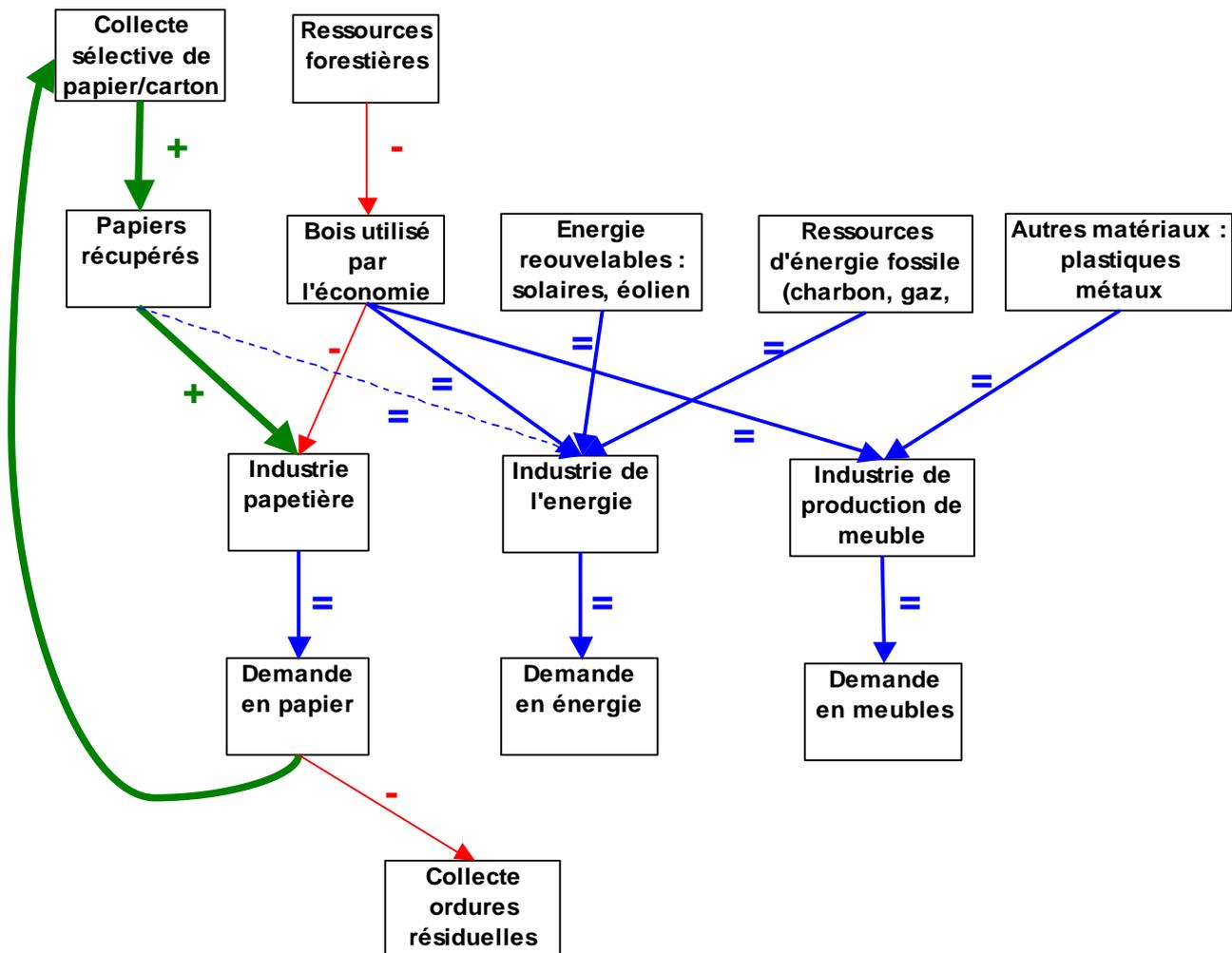


Figure 7 : Réactions du marché dans le cas où la demande en bois est inférieure à la production possible

2. *L'accès à la ressource bois est limitée : concurrence entre secteurs économiques*

a. *Les énergies renouvelables sont une solution économiquement rentable*

Ce scénario repose sur deux hypothèses principales :

- La croissance de la demande sera plus forte que celle de l'offre, l'accès à la ressource bois sera alors limité ;
- Les énergies renouvelables, et la filière bois-énergie en particulier, seront au moins aussi rentables financièrement que les sources d'énergie fossiles et nucléaires.

La biomasse est une source d'énergie importante qui peut être considérée comme une des alternatives permettant de lutter contre les émissions de gaz à effet de serre et contre la dépendance énergétique. Cette ressource peut donc être en concurrence sur le marché de l'énergie.

Dans le scénario 2a, les prix des sources d'énergie classiques (fossile, nucléaire) ont augmenté suffisamment pour que l'énergie produite à partir de biomasse soit compétitive (et, dans une moindre mesure, les coûts de production à partir des ENR ont baissé). Une concurrence a donc lieu pour la production d'énergie entre les énergies classiques et la biomasse.

En outre, étant donné que dans ce scénario l'offre de bois est limitée, il y a une concurrence pour l'accès à la ressource bois et les consommations en bois des différentes filières économiques sont interdépendantes : le bois non-consommé par une filière donnée le sera par une autre.

En conclusion, dans le scénario 2a, le bois non-utilisé grâce au recyclage du papier est valorisé en filière bois-énergie (production de chaleur principalement) et se substitue à une utilisation de source d'énergie fossile.

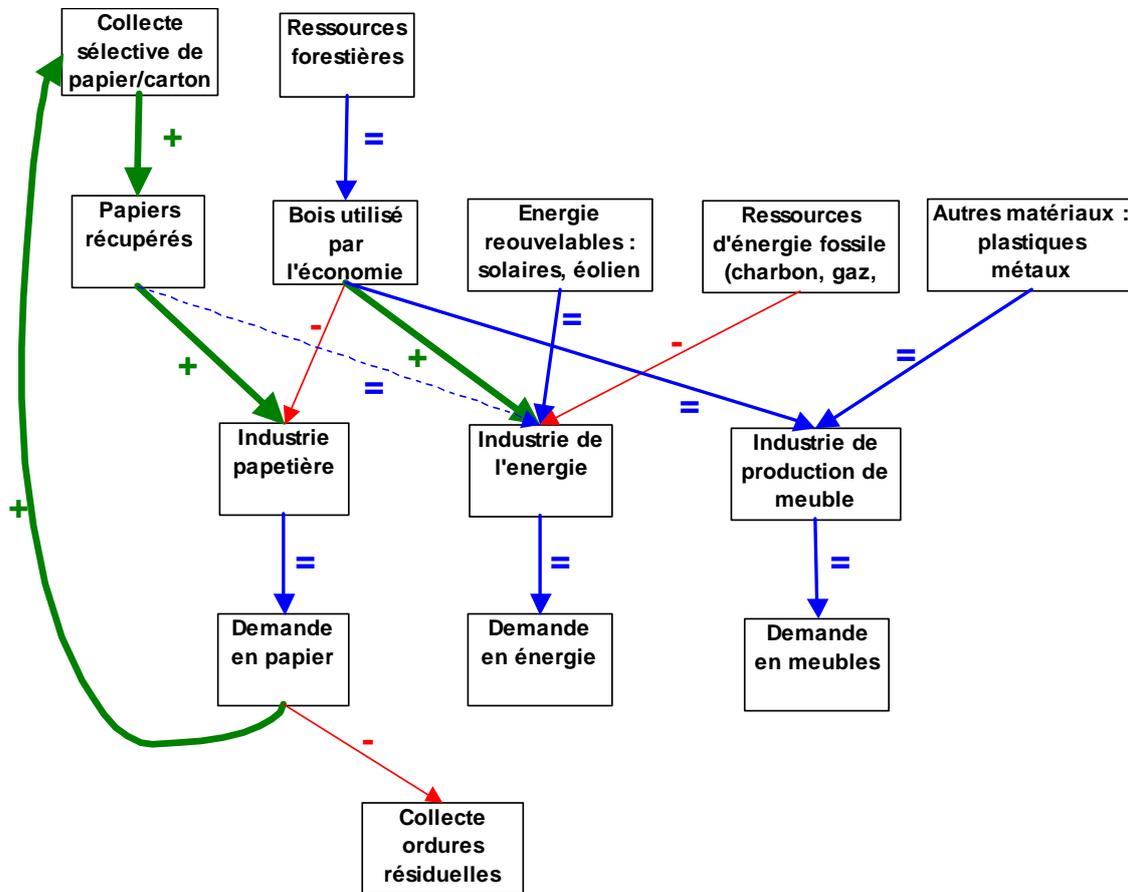


Figure 8 : Réactions du marché dans le cas où la demande en bois est supérieure à la production et que les énergies renouvelables sont compétitives par rapport aux énergies fossiles

b. Les énergies renouvelables ne sont pas rentables par rapport aux sources fossiles « classiques »

Ce scénario repose sur deux hypothèses principales :

- La croissance de la demande sera plus forte que celle de l'offre, l'accès à la ressource bois sera alors limité.
- Les énergies renouvelables, et la filière bois énergie en particulier, demeureront moins rentables que les sources d'énergie fossiles et nucléaires.

L'Europe a défini des objectifs à l'horizon 2020 concernant la production d'énergie renouvelable à atteindre (ENR). Ces objectifs sont élevés et nécessitent de faire appel à un ensemble de mesures et de technologies variées pour y parvenir. Le scénario 2b considère que l'ensemble de ces productions sont moins rentables que les sources d'énergie classiques (fossile et nucléaire) et le recours aux sources d'énergie renouvelables est poussé par des décisions politiques et non-par des considérations économiques. Ainsi, les producteurs d'électricité atteindront le niveau d'énergie renouvelable fixé par les politiques, mais ne dépasseront pas celui-ci.

Le scénario 2b présume en outre que si la quantité d'ENR produite est fixée par les objectifs politiques, le mix ENR peut varier. Dès lors, une concurrence a donc lieu entre les énergies renouvelables.

Sur base de ce scénario, l'offre de bois est limitée et il y a donc une concurrence pour l'accès à la ressource bois.

En conclusion, dans le scénario 2b, le bois non-utilisé grâce au recyclage du papier est valorisé en filière bois-énergie et se substitue à une autre source d'énergie renouvelable moins rentable (éolien, solaire, ...).

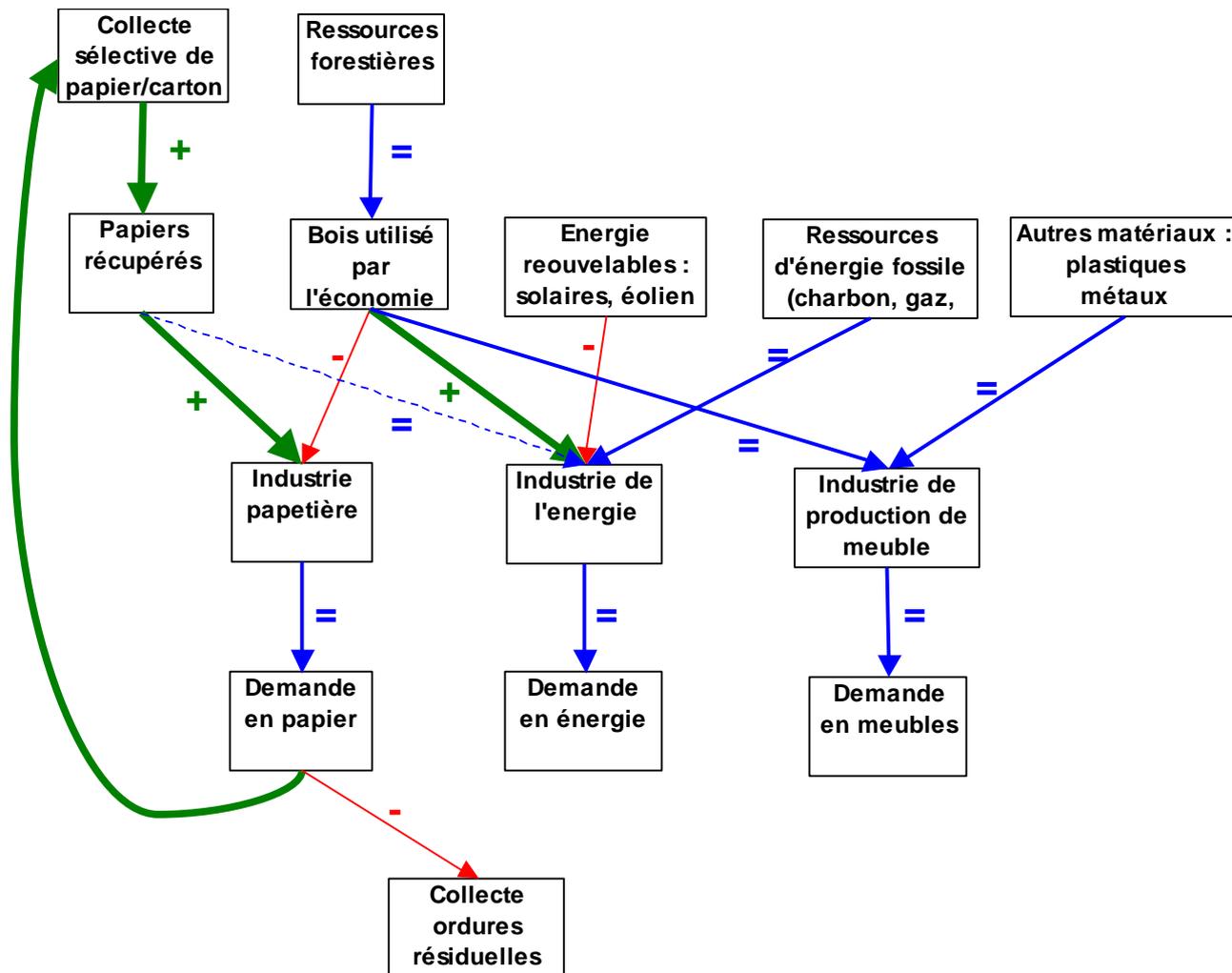


Figure 9 : Réactions du marché dans le cas où la demande en bois est supérieure à la production et que les énergies renouvelables ne sont pas compétitives par rapport aux énergies fossiles

Synthèse de la modélisation suivant l'approche conséquentielle :

Suivant le scénario considéré, la modélisation du bénéfice engendré par une non-consommation de bois grâce au recyclage des PC variera fortement :

- **scénario 1** : pas de concurrence pour l'accès à la ressource bois. Le bois non-consommé n'est pas utilisé pour autre chose, il n'y a pas de substitution.
- **scénario 2a** : concurrence pour l'accès à la ressource bois et ENR compétitives par rapport aux énergies fossiles. Le bois non-consommé est utilisé afin de produire de la chaleur. La chaleur produite se substitue à une production de chaleur à base d'énergie fossile.
- **scénario 2b** : concurrence pour l'accès à la ressource bois et ENR non-compétitives par rapport aux énergies fossiles. Le bois non-consommé est utilisé afin de produire de l'énergie. Cette énergie se substitue à de l'énergie produite à partir de sources renouvelables (éolien, solaire, ...)

IV.2.5.3 Utilisation des PCR dans les différentes productions de papier recyclé

A. PCR utilisés en fonction des papiers/cartons produits

Les débouchés des différents types de PCR dans les pays membres du CEPI sont détaillés dans la figure et le tableau ci-dessous.

Débouchés	Mixed grade (boîte de céréales)	Newspapers & magazines (journaux)	High grade (papier d'impression des bureaux)	Corrugated & Kraft
Cartons plats (type boîte de céréales)	18 %	3 %	16 %	2 %
Journaux	2 %	65 %	2 %	0 %
Cartons ondulés	50 %	2 %	16 %	83 %
Papiers graphiques	2 %	19 %	15 %	0 %
Papiers sanitaires	3 %	7 %	39 %	0 %
Autres	25 %	4 %	12 %	15 %
Total	100 %	100 %	100 %	100 %

Tableau 7 : Débouchés européens des PCR étudiés²³

²³ Valeur calculées sur base de données du rapport « Key statistics 2006 », réalisé par le CEPI

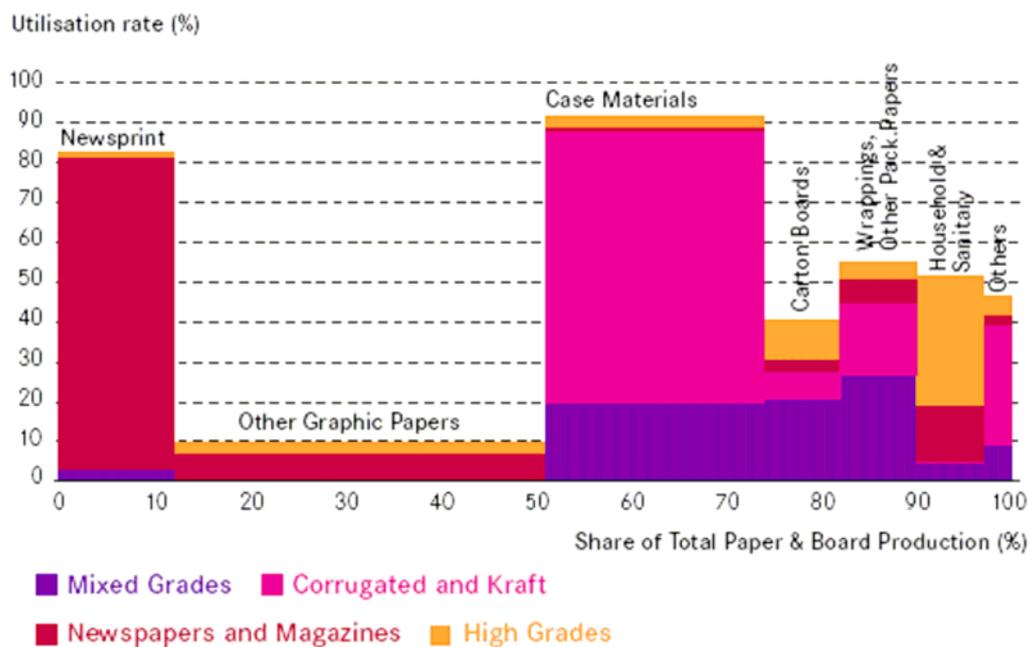


Figure 10 : Débuchés des PCR dans la production de papier des pays du CEPI

Source : « Key statistics 2006 », réalisé par le CEPI

L'unité en ordonnée correspond au taux d'utilisation de PCR du secteur, soit : la quantité de PCR utilisée / la quantité de papier produite. Les 4 couleurs correspondent aux différentes qualités de PCR (voir section 0).

Par exemple, le secteur des journaux (« Newsprint ») consomme annuellement 9 485 tonnes (t) de PCR (essentiellement du grade « Newspaper & magazine ») et produit 11 244 t. Le taux d'utilisation de PCR est dans ce cas de 84,4 %.

L'unité en abscisse correspond à la part que représente le produit sur le marché global du papier. Par exemple, le secteur des journaux (« Newsprint ») produit chaque année 11 244 t de papier journal, alors que la production globale de papier est de 102 231 t. La part de marché des journaux est donc de 11 %.

En considérant que l'apport de PCR supplémentaires ira préférentiellement dans la filière principale utilisant actuellement les PCR de cette qualité, les débouchés modélisés dans cette étude seront les suivants :

- Les PCR de type « Mixed grade » (boîtes de céréales – origine ménagère) serviront à la production de carton ondulé
- Les PCR de type « Newspaper & magazines » (journaux - origine ménagère) serviront à la production de journaux
- Les PCR de type « High grade » (papiers d'impression des bureaux) serviront à la production de papier sanitaire
- Les PCR de type « Corrugated & Kraft » (cartons ondulés des commerces) serviront à la production de carton ondulé

Modélisation suivant l'approche conséquentielle :

Les PCR étudiés serviront à la production des papiers suivants :

- Les boîtes de céréales (origine ménagère) serviront à la production de carton ondulé
- Les journaux (origine ménagère) serviront à la production de journaux
- Les papiers d'impression des bureaux serviront à la production de papier sanitaire
- Les cartons ondulés des commerces serviront à la production de carton ondulé

B. Pâte remplacée en fonction des papiers produits

Il existe trois grands types de pâtes à papier utilisées lors de la fabrication de papier ou de carton. Chacune de ces pâtes présentent des caractéristiques techniques ainsi que des rendements de production différents :

- Pâte mécanique

Cette pâte est obtenue en broyant le bois par des énormes meules (défibreuseuses). Les fibres sont ainsi séparées les unes des autres. Cette pâte comporte une part importante de lignine et ne présente pas de bonnes caractéristiques mécaniques (résistance). Elle a toutefois l'avantage de présenter un rendement « tonne de pâte/tonne de bois entrant » très élevé (de l'ordre de 95 à 97 %) mais consomme beaucoup d'énergie mécanique. Elle est principalement utilisée pour la fabrication de papier journal et également dans la production de papier d'impression de qualité standard (les papiers d'impression de haute qualité font appel à des pâtes chimiques).

- Pâte semi-mécanique

Il s'agit d'une pâte subissant un traitement thermique, chimique et mécanique. Lors de sa production, les copeaux de bois subissent simultanément un traitement thermique et chimique (sulfite de sodium), avant d'être broyés mécaniquement. Ces traitements permettent de disposer de fibres plus longues qui confèrent au papier une résistance plus importante. Le rendement « t pâte/t bois entrant » de 90 à 94 % est légèrement inférieur à celui des pâtes mécaniques.

- Pâte chimique

Cette pâte est produite en procédant à la cuisson des copeaux de bois avec de la liqueur blanche. Celle-ci contient de l'hydroxyde de sodium et du sulfure de sodium qui dissolvent la lignine. Les produits chimiques et la lignine étant récupérés ensuite (liqueur noire). L'élaboration de cette pâte consomme peu d'énergie électrique mais une quantité importante de chaleur, généralement produite par la combustion de la liqueur noire. La pâte obtenue par ce procédé possède de très bonnes caractéristiques mécaniques mais le rendement « t pâte/t bois entrant » n'est que de 50 % environ.

De par leurs caractéristiques, chacune des pâtes est privilégiée pour un type d'application particulier, comme le montre la figure ci-dessous.

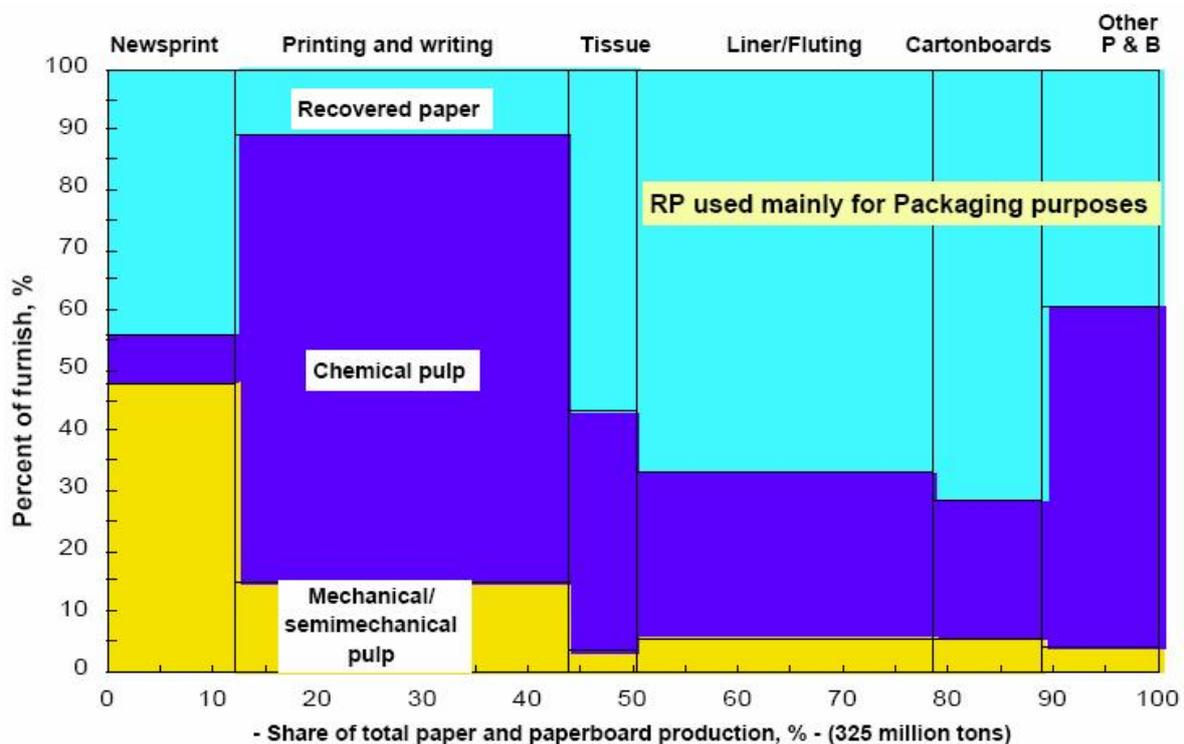


Figure 11 : Utilisation des matières de base dans la production de papier mondiale, en fonction du produit fini

Source : "The limit of paper recycling", réalisé en 2007 par Jaakko Pöyry Consulting

Les différentes matières premières représentées sont :

- Les papiers et cartons récupérés (PCR)
- La pâte chimique
- La pâte mécanique

Dans cette figure, l'abscisse représente la part de production d'un type de papier par rapport à la production totale, et l'ordonnée représente la part des différentes matières premières utilisées dans la production du papier.

Selon le CEPI, une bonne approximation consiste à dire que les PCR utilisés dans la production d'un papier remplaceront la pâte à papier utilisée majoritairement. En se basant sur la figure 11, il faut donc considérer :

- Une substitution de pâte mécanique dans le cas de production de papier journal
- Une substitution de pâte chimique dans l'ensemble des autres cas.

Modélisation suivant l'approche conséquentielle :

Les pâtes vierges substituées par l'utilisation de PCR sont :

- Production de carton ondulé : les PCR se substituent à de la pâte chimique
- Production de journaux : les PCR se substituent à de la pâte thermo-mécanique
- Production de papier sanitaire : les PCR se substituent à de la pâte chimique

IV.2.6. Données techniques

IV.2.6.1 Production de pâte de papier recyclée

Suivant les applications qui sont faites des PCR, la production de pâte recyclée varie. Ces différences sont dues notamment à la nécessité d'une étape de désencrage ou non, mais aussi à la teneur en lignine et additifs acceptables (très basse dans le cas des papiers sanitaires).

Les données fournies ci-dessous correspondent à la préparation des pâtes recyclées, mais excluent la transformation de la pâte en papier.

A. Recyclage de PCR « mix grade » et « corrugated board » en pâte utilisée pour la production de carton ondulé

Sur base de données de la littérature, nous avons modélisé cette production en considérant les caractéristiques reprises dans les tableaux ci-dessous. Le flux de PCR considéré est un flux de « mixed grade » ou de carton ondulés (« Corrugated board »).

Contrairement aux autres chaînes de recyclage de PCR étudiées, il n'y a pas de désencrage lors de la production de la pâte.

<i>Consommations pour une tonne de pâte</i>	
	Consommation issue des BREFS
Efficacité du processus de recyclage	90 à 94 % (1,1 tonne de PCR entrant donne 1 t de pâte recyclée)
Consommation d'électricité	150 à 250 kWh/t
Consommation de chaleur	0 MJ/t
Consommation d'eau	1 à 2 m ³ /t *
Produits chimiques	
Biocides	0 à 0,12 kg/t

Tableau 8 : Consommations pour la production d'une tonne de pâte de papier recyclée, destinée à la fabrication de cartons ondulés

* La valeur de consommation d'eau considérée ne tient compte que de la consommation nette, c'est-à-dire la différence entre la consommation d'eau totale et les rejets d'eau. Les charges polluantes des eaux rejetées sont considérées séparément de la consommation nette d'eau.

<i>Émissions pour une tonne de pâte en sortie d'usine</i>	
	Consommation issue des BREFS
Efficacité du processus de recyclage	90 à 94 % (1,1 tonne de PCR entrant donne 1 t de pâte recyclée)
DBO ₅	0 à 200 g/t
DCO	0 à 2 200 g/t
Azote organique	30 g/t
Phosphore	10 g/t
Matière en suspension	0 à 500 g/t

Tableau 9 : émissions à la production d'une tonne de pâte de papier recyclée de type wellenstoff, destinée à la fabrication de cartons ondulés

Lors du recyclage d'une tonne de PCR, 60 à 100 kg de fibres sont perdues (dépendant du rendement). Celles-ci sont en mélange avec les impuretés dans les boues de recyclage, et sont incinérées sur le site de production, avec récupération de chaleur.

B. Production de pâte désencrée

Il existe plusieurs types de pâtes désencrées. Les consommations pour la production de celles-ci sont spécifiées par type de pâte (voir tableaux dans les sections ci-dessous), mais pour les émissions de polluants dans l'eau, seules des valeurs moyennes pour l'ensemble des pâtes désencrées sont disponibles (reprises dans le tableau ci-dessous).

<i>Émissions pour une tonne de pâte en sortie d'usine</i>	
Ressource	Émissions issue des BREFS
DBO ₅	90 g/t
DCO	3 100 g/t
Azote organique	80 g/t
Phosphore	Non communiqué

Tableau 10 : émissions de polluants dans l'eau lors de la production de pâte désencrée (après traitement des eaux usées)

B.1 Recyclage de « Newspaper grade » en pâte destinée à la production de journaux

La production de pâte à papier pour la production de journaux est en procédé moins exigeant que celui de la production de papier sanitaire. Le rendement est donc plus élevé et les consommations d'énergies sont moindres.

<i>Consommations pour une tonne de pâte</i>	
Ressource	Consommation issue des BREFS
Rendement	75 à 85 % (1,25 tonne de PCR entrant donne 1 t de pâte recyclée)
Consommation d'électricité	300 à 420 kWh/t
Consommation de chaleur	450 à 900 MJ/t
Consommation d'eau	1 à 2 m ³ /t *
Produits chimiques	
Peroxyde d'hydrogène (H ₂ O ₂)	15 à 30 kg/t
Soude (NaOH)	10 à 22 kg/t
Silicate de sodium (NaSiO ₃)	20 à 38 kg/t
Dithionite	4 à 10 kg/t
Agents chélatants	0,5 à 1 kg/t
Savon	5 à 10 kg/t

Tableau 11 : Consommations pour la production d'une tonne de pâte de papier recyclée destinée à la fabrication de journaux

* La valeur de consommation d'eau considérée ne tient compte que de la consommation nette, c'est à dire la différence entre la consommation d'eau totale et les rejets d'eau. Les charges polluantes des eaux rejetées sont considérées séparément de la consommation nette d'eau.

Lors du recyclage d'une tonne de PCR, 200 kg de fibres sont perdues (dépendant du rendement). Celles-ci sont en mélange avec les impuretés dans les boues de recyclage, et sont incinérées sur le site de production, avec récupération de chaleur.

B.2 Recyclage de « high grade » en pâte servant à la production de papier sanitaire

La production de pâte à base de PCR pour la fabrication de papier sanitaire engendre des pertes relativement élevées, car la production de papier sanitaire nécessite l'utilisation de fibres longues (en quantité nettement supérieure à d'autres applications, telles que le papier journal par exemple). Le rendement n'est alors que de 60 %. Cela signifie donc que 40 % des fibres des PCR ne sont pas utilisables (trop courtes ou en paquet) et sont éliminées.

<i>Consommations pour une tonne de pâte</i>	
Ressource	Consommation issue des BREFS
Rendement	55 à 65 % (1,6 tonne de PCR entrant donne 1 t de pâte recyclée)
Consommation d'électricité	400 à 500 kWh/t
Consommation de chaleur	650 à 1 100 MJ/t
Consommation d'eau	1 à 2 m ³ /t *
Produits chimiques	
Peroxyde d'hydrogène (H ₂ O ₂)	10 à 30 kg/t
Soude (NaOH)	5 à 12 kg/t
Silicate de sodium (NaSiO ₃)	10 à 18 kg/t
Dithionite	4 à 10 kg/t
Agents chélatants	1,8 à 2,8 kg/t
Savon	3 à 6 kg/t

Tableau 12 : Consommations pour la production d'une tonne de pâte de papier recyclée destinée à la fabrication de papier sanitaire

* La valeur de consommation d'eau considérée ne tient compte que de la consommation nette d'eau, c'est à dire la différence entre la consommation d'eau totale et les rejets d'eau. Les charges polluantes des eaux rejetées sont considérées séparément de la consommation nette d'eau.

Lors du recyclage d'une tonne de PCR, 400 kg de fibres sont perdues (dépendant du rendement). Celles-ci sont en mélange avec les impuretés dans les boues de recyclage, et sont incinérées sur le site de production, avec récupération de chaleur.

IV.2.6.2 Production de pâte à papier vierge, consommations et émissions

Afin de comparer les productions de pâte à papier à des stades similaires, nous considérons des sites de production intégrée, c'est à dire où la pâte à papier est instantanément transformée en papier. Néanmoins, nous ne tenons compte que des consommations liées à la production de la pâte à papier.

Les surplus d'énergie produits dans le cas de pâte chimique (liée à l'incinération de la liqueur noire produite lors de la production de papier) sont pris en compte par extension de système. L'énergie produite par la papeterie, qui est injectée sur le réseau (de chaleur ou d'électricité), ne doit plus être produite par les moyens de production classiques.

Les procédés utilisés pour la modélisation de la production de pâte sont issus d'EcolInvent 2.0, et sont adaptés sur deux points :

- Ces procédés prennent en compte le séchage de la pâte, or, la comparaison entre recyclé et vierge considère de la pâte dans des usines intégrées. Nous retranchons donc une consommation moyenne de séchage de pâte des procédés EcolInvent (donnée issue des BREFS de l'INERIS).

<i>Consommations pour le séchage d'une tonne de pâte</i>	
Type d'énergie	Consommation issue des BREFS
Chaleur	3 000 MJ/t
Électricité	100 kWh/t

Tableau 13 : Consommation d'énergie de séchage soustraite des procédés de production de pâte d'EcolInvent 2.0

- Dans ses procédés, EcolInvent fait appel à des mix électriques moyens. Afin d'appliquer l'approche conséquentielle, ces mix électriques sont remplacés par des mix conséquentiels.

Ce travail implique :

- Une désagrégation du procédé EcolInvent, afin de soustraire les impacts de la consommation électrique
- L'ajout des impacts d'une consommation identique provenant du mix conséquentiel défini

A. Production de pâte mécanique

La technologie retenue est une production de pâte thermo-mécanique. Avec ce procédé, la pâte est obtenue en râpant le bois contre une meule, sous vapeur à température et pression élevées.

Nous considérons dans le cas présent une pâte thermo-mécanique, comportant un blanchiment.

La modélisation fait appel au procédé de production de pâte « *thermo-mechanical pulp, at plant, RER, [kg]* » de la base de donnée EcolInvent 2.0, en apportant les modifications suivantes :

- Soustraction des consommations liées au séchage, détaillées dans le Tableau 13
- Changement de mix électrique :
 - Les consommations directes de ce procédé sont :

<i>Consommations électriques directes du procédé thermo-mechanical pulp, at plant, RER, [kg]</i>	
Type d'énergie	Consommation issue des BREFS
Mix NORDEL	1 480 kWh/t
Mix UCTE	676 kWh/t

Leurs impacts sont substitués par ceux des mix conséquentiels considérés, présentés au chapitre IV.2.6.5A.

- Le mix électrique utilisé pour les consommations indirectes (électricité entrant en compte lors de la production des agents chimiques utilisés) n'est pas modifié. Il s'agit généralement d'un mix moyen de l'UCTE.

Les valeurs de consommation sont reprises dans le Tableau 14.

Consommations pour la production d'une tonne de pâte thermo-mécanique vierge	
Ressource	Consommation du procédé EcoInvent
Bois conifère (softwood)	2,2 m ³ /t
Bois feuillu (hardwood)	Inférieur à 0,1 m ³ /t
Eau	23 m ³ /t ²⁴
Électricité	2 150 kWh/t
Chaleur	205 MJ/t

Tableau 14 : Consommations de ressources lors de la production de pâte thermo-mécanique

Consommations pour la production d'une tonne de pâte thermo-mécanique vierge	
Polluants	Émissions du procédé EcoInvent
DBO ₅	0,9 kg/t
DCO	4,37 kg/t
Azote	60 g/t
Phosphore	10 g/t

Tableau 15 : émissions dans l'eau lors de la production de pâte mécanique

La production de pâte thermo-mécanique n'engendre pas de production nette de chaleur ou d'électricité, il n'y a donc pas d'énergie fournie au réseau.

B. Production de pâte chimique

La technologie retenue pour la fabrication de pâte chimique est une production de pâte kraft. Cette technologie représente actuellement 92 % de la production de pâte chimique dans les pays membres du CEPI, contre 8 % pour celles à base de sulfite. Les prévisions tablent en outre sur une diminution de la production de ces dernières (voir Figure 3).

B.1 Pâte kraft blanchie

Le procédé de production de pâte kraft comporte une étape de blanchiment. Lorsque le blanchiment utilise des traces d'éléments chlorés, la méthode s'appelle ECF (Elementally chlorine free). Lorsque le blanchiment est totalement exempt d'éléments chlorés, la méthode s'appelle TCF (Totally chlorine free).

²⁴ Cette consommation comprend l'eau de refroidissement

Dans un premier temps, la modélisation est faite en utilisant le procédé de production de pâte « *sulphate pulp, ECF bleached, at plant, RER, [kg]* » (procédé ECF) de la base de donnée EcoInvent 2.0, en apportant les modifications suivantes :

- Soustraction des consommations liées au séchage, détaillées dans le Tableau 13
- Changement de mix électrique :
 - Les consommations directes de ce procédé sont :

<i>Consommations électriques directes du procédé sulphate pulp, ECF bleached, at plant, RER, [kg]</i>	
Type d'énergie	Consommation issue des d'EcoInvent
Mix NORDEL	40 kWh/t
Mix UCTE	30 kWh/t

Leurs impacts sont substitués par ceux des mix consécutifs considérés, présentés au chapitre IV.2.6.5A.

- Le mix électrique utilisé pour les consommations indirectes (électricité entrant en compte lors de la production des agents chimiques utilisés) n'est pas modifié. Il s'agit généralement d'un mix moyen de l'UCTE.

Les valeurs de consommation de ce procédé sont reprises dans le Tableau 16.

Ressource	Consommation du procédé EcoInvent
Bois conifère (softwood)	2,9 m ³ /t
Bois feuillu (hardwood)	1,6 m ³ /t
Eau	74 m ³ /t ²⁵
Électricité	70 kWh/t
Chaleur	2 200 MJ/t

Tableau 16 : Consommations de ressources lors de la production de pâte kraft blanchie

Polluants	Émissions du procédé EcoInvent
DBO ₅	0,71 kg/t
DCO	26,64 kg/t
MES	1,06 kg/t
AOX	0,19 kg/t
Azote	210 g/t
Phosphore	20 g/t

Tableau 17 : Émissions dans l'eau lors de la production de pâte kraft blanchie

²⁵ Cette consommation comprend l'eau de refroidissement

Les consommations d'énergie sont relativement faibles en comparaison des besoins réels de chaleur des différentes étapes de la production de pâtes. Ceci est dû à une importante auto-production d'énergie par incinération de la liqueur noire, coproduit de la production de la pâte à papier. L'intégralité du surplus de chaleur produit est considéré comme utilisé, soit par la chaîne de production de papier (dans le cas d'une usine intégrée) soit en étant injecté sur un réseau de chaleur.

Énergie	Surplus injecté sur le réseau
Electricité	180 kWh/t
Chaleur	1 390 MJ/t

Tableau 18 : Surplus d'énergie lié à la production d'une tonne de pâte kraft blanchie

B.2 Pâte kraft non-blanchie

La production de pâte kraft écrue est modélisée par le procédé « *sulphate pulp, unbleached, at plant, RER* » de la base de donnée EcoInvent 2.0, en apportant les modifications suivantes :

- Soustraction des consommations liées au séchage, détaillées dans le Tableau 13
- Changement de mix électrique :
 - Les consommations directes de ce procédé sont :

<i>Consommations électriques directes du procédé sulphate pulp, ECF bleached, at plant, RER, [kg]</i>	
Type d'énergie	Consommation issue des d'EcoInvent
Mix NORDEL	238 kWh/t
Mix UCTE	178 kWh/t

Leurs impacts sont substitués par ceux des mix consécutifs considérés, présentés au chapitre IV.2.6.5A.

- Le mix électrique utilisé pour les consommations indirectes (électricité entrant en compte lors de la production des agents chimiques utilisés) n'est pas modifié. Il s'agit généralement d'un mix moyen de l'UCTE.

Les valeurs de consommation de ce procédé sont reprises dans le Tableau 19.

Ressource	Consommation du procédé EcoInvent
Bois conifère (softwood)	2,45 m ³ /t
Bois feuillu (hardwood)	1,33 m ³ /t
Eau	84 m ³ /t ²⁶
Électricité	416 kWh/t
Chaleur	2 000 MJ/t

Tableau 19 : Consommations de ressources lors de la production de pâte kraft non-blanchie

²⁶ Cette consommation comprend l'eau de refroidissement

Polluants	Émissions du procédé Ecolvent
DBO ₅	2,04 kg/t
DCO	10,34 kg/t
MES	1,23 kg/t
AOX	-
Azote	220 g/t
Phosphore	20 g /t

Tableau 20 : émissions dans l'eau lors de la production de pâte kraft non-blanchie

Les consommations d'énergie sont relativement faibles en comparaison des besoins réels de chaleur des différentes étapes de la production de pâtes (de l'ordre de 10 000 MJ/t). Ceci est dû à une importante auto-production d'énergie par incinération de la liqueur noire, coproduit de la production de la pâte à papier. Cette auto-production engendre un surplus d'énergie, revendu sur le réseau. L'intégralité du surplus de chaleur produit est considéré comme utilisé, soit par la chaîne de production de papier (dans le cas d'une usine intégrée) soit en étant injecté sur un réseau de chaleur. La valeur de ce surplus est considérée identique entre les productions de pâte blanchie et de pâte écrue.

Énergie	Surplus injecté sur le réseau
Electricité	180 kWh/t
Chaleur	1 390 MJ/t

Tableau 21 : Surplus d'énergie lié à la production d'une tonne de pâte kraft blanchie

IV.2.6.3 Transports

A. Trajet centre de tri - recycleur

Pour rappel, l'analyse de cycle de vie commence à la sortie du centre de tri.

Pour le transport des PCR entre le centre de tri et l'usine de recyclage, nous considérons les hypothèses suivantes :

- Trajet parcouru en camion de type semi-remorque (charge utile maximale : 24 t)
- Chargement réel du camion : 23 t de PCR (capacité du camion limitée par le volume)
- Distance moyenne entre le centre de tri et l'usine de recyclage : 150 km (modélisée par un champ de valeur allant de 100 à 200 km)

Sur base de ces hypothèses, le transport d'une tonne de PCR du centre de tri à l'usine de recyclage implique le parcours en camion d'une distance moyenne de 6,5 km.

Nous considérons par hypothèse un taux de retour à vide du trajet entre le centre de tri et l'usine de recyclage de 21 %, qui est la valeur utilisée dans la méthode BilanCarbone.

B. Trajet pris en compte pour la production de pâte à papier vierge

Les procédés de production de pâte à papier vierge prennent en compte les impacts des transports liés à l'acheminement du bois jusqu'au site de production de la pâte. Ces transports ont pour caractéristiques :

- Un trajet parcouru :
 - À 80 % en camion
 - À 20 % en train

Ces valeurs reflètent deux situations distinctes. La première considère des transports effectués uniquement en camion (80 % des cas), et la seconde prend en compte des trajets réalisés uniquement en train (20 % des cas).

- Une distance moyenne de 100 km
- Chargement réel des camions : non-communicé

C. Bilan transport

Paramètres	Pâte à base de PCR	Pâte vierge
Distance	100 à 200 km	100 km
Mode de transport	Camion	80 % camion 20 % train
Chargement réel	23 t (charge utile maximale de 24 t)	Non communiqué
Taux de retour à vide	21 %	0 %

Tableau 22 : Données de transport des pâtes vierge et des pâtes recyclées

D. Nuisances liées aux transports

Pour le calcul des nuisances liées aux transports, nous nous basons sur les hypothèses suivantes :

- Utilisation des facteurs de monétarisation moyens
- Les trajets sont constitués de 90 % de transports ruraux et de 10 % de transports urbains
- Les charges utiles réelles des véhicules sont les suivantes :
 - 23 t pour les camions
 - 1 200 t pour les trains, sur base d'une charge utile réelle de 40 t/wagon et de 30 wagons par train.

Véhicule		Rural	Urbain
Camion	Répartition urbain/rural	90 %	10 %
	Facteur de monétarisation	0,33 € ₂₀₀₇ /véhicule	0,60 € ₂₀₀₇ /véhicule
Train	Répartition urbain/rural	90 %	10 %
	Facteur de monétarisation	0,67 € ₂₀₀₇ /véhicule	5,40 € ₂₀₀₇ /véhicule

Tableau 23 : Facteurs de monétarisation utilisés pour la modélisation des nuisances liées aux transports

Remarque :

La prise en compte de la production de pâte à papier et non de papier aura pour conséquence de sous-estimer les nuisances liées aux transports pour la production de papier vierge. En effet, le papier recyclé parcourt généralement de moins longues distances entre l'usine de recyclage et les lieux de consommation que la papier vierge entre la papeterie et ces lieux de consommation.

En outre, le fait de considérer uniquement la production de pâte à papier ne tient pas compte des distances parcourues par la pâte entre l'usine de pâte et la papeterie dans le cas d'usines non intégrées (qui traitent uniquement du papier vierge).

IV.2.6.4 Fin de vie évitée par les déchets papiers/carton

A. Traitement d'élimination

Lorsque des PCR sont envoyés en recyclage, ils évitent une fin de vie en élimination traditionnelle.

Fin de vie des déchets ménagers

La fin de vie évitée par les cartons pliants ainsi que par les journaux est modélisée comme étant une élimination type des ordures ménagères défini comme ci-après :

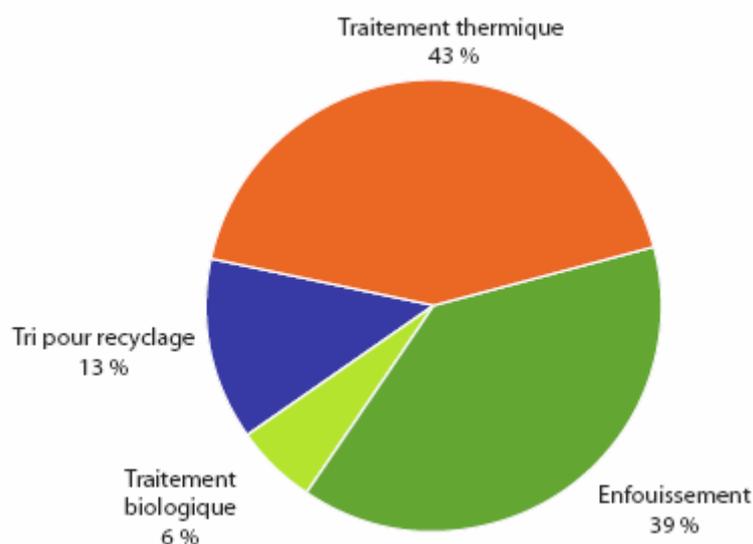


Figure 12 : Traitement de fin de vie des ordures ménagères en France

Source : « Les déchets en chiffre – Édition 2007 », réalisé par l'ADEME

La répartition entre les traitements d'élimination est la suivante (données ITOM 2006) :

- 53 % des déchets éliminés sont incinérés
- 47 % des déchets éliminés sont enfouis

Fin de vie des déchets des entreprises

Dans le cas des cartons ondulés ou des papiers de bureaux, les PCR sont intégrés dans un flux de collecte de déchets non ménagers résiduels. Dans ce cas, la fin de vie modélisée est celle de la fin de vie traditionnelle des déchets concernés. Dans le cas du papier, la répartition entre les filières d'élimination est²⁷ :

- 43 % d'incinération
- 57 % de mise en CSDU

En se basant sur les chiffres de l'enquête ITOM 2006, les incinérateurs présentent en moyenne les caractéristiques suivantes :

- Un rendement net de récupération de chaleur moyen de 20 %
- Un rendement net de production électrique moyen de 8 %

Ces valeurs correspondent aux productions d'électricité et de chaleur vendues par les incinérateurs (l'autoconsommation est donc exclue), divisées par le contenu énergétique total (PCI) des ordures ménagères envoyées en traitement de fin de vie.

Sur base du rapport « Les déchets en chiffre – Édition 2007 » de l'ADEME, la production d'électricité et de chaleur liée à la récupération des biogaz de décharge peut être négligée. En effet, la valorisation de ces gaz correspond aux rendements suivants :

- Un rendement brut de récupération de chaleur inférieur à 1 %
- Un rendement brut de récupération électrique inférieur à 2 %

Ces valeurs correspondent aux quantités d'électricité et de chaleur totales produites par les décharges (l'autoconsommation est donc comprise), divisées par le contenu énergétique total des ordures ménagères envoyées en traitement de fin de vie.

Remarque :

1. *La répartition entre la fin de vie des papiers des entreprises sous-estime probablement la fraction envoyée en CSDU. En effet, les déchets en mélange des entreprises sont envoyés à près de 70 % en décharge, or ce mélange contient probablement une fraction papier. Dans l'indisponibilité de données plus fine, les données de l'enquête ont été utilisées.*
2. *La modélisation de la fin de vie en CSDU des papiers et cartons considère une dégradation de 27 % de la matière à un horizon temporel de 100 ans. Les émissions de carbone biogénique sont donc moindres que dans le cas de l'incinération, où 100 % de la matière est dégradée.*
3. *Même si le parc d'incinérateurs ne couvre qu'un peu plus de la moitié des besoins, cette donnée globale représente un ensemble de situations où soit 100 % des déchets sont incinérés (collectivités avec incinérateur) ou soit (des collectivités) où il n'y a pas d'incinérateur. Comme les déchets ménagers voyagent relativement peu, on peut faire l'hypothèse que ces collectivités sont cloisonnées et que celles avec incinérateur ont chacune*

²⁷ Source : Étude ADEME : Évaluation de la production nationale des déchets des entreprises en 2004, ADEME.

une petite réserve de capacité pour satisfaire leurs besoins. Dès lors, une diminution de la quantité de papiers & cartons dans le flux de déchets va libérer des capacités d'incinération qui ne seront pas exploitées.

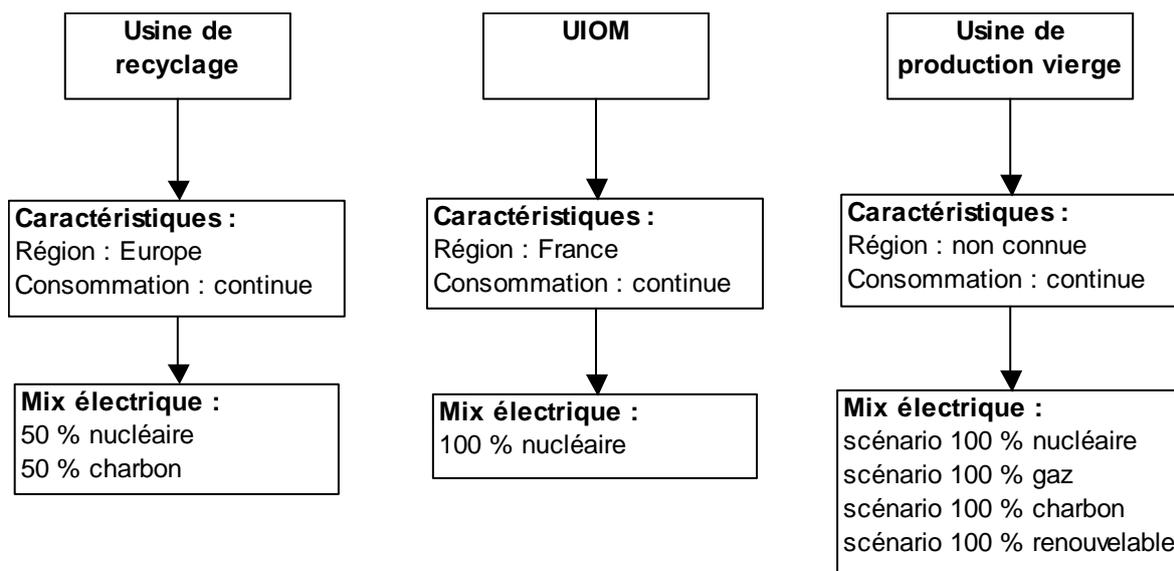
B. Production de chaleur et d'électricité substituée

Comme évoqué dans le point précédent, l'incinération de déchets permet une production de chaleur et d'électricité. En se plaçant dans une approche conséquentielle, il convient de définir quelles seront les productions évitées.

- Dans le cas de la production d'électricité, les incinérateurs fonctionnent 24 h sur 24, tous les jours de l'année. L'électricité produite par les incinérateurs se substitue donc à des centrales françaises de base. Pour plus de détails, le lecteur se référera au chapitre IV.2.6.5D.
- Dans le cas de la production de chaleur, les incinérateurs produisent de l'énergie qui se substitue à des productions classiques de chaleur. La chaleur se substitue donc aux moyens de production de chaleur français. Pour plus de détails, le lecteur se référera au chapitre IV.2.6.6C.

IV.2.6.5 Mix électriques utilisés

A. Vue globale des différents mix utilisés



B. Mix électrique des consommations des usines de production de pâte à papier

Les usines de production de papier ont des consommations d'électricité, dont les principales caractéristiques sont détaillées ci-dessous :

- Ces installations fonctionnent 24 h sur 24, leur consommation d'électricité est donc continue et fait appel à des centrales électriques de base.
- La région de production, qui est considérée sous forme de scénario

Les moyens de production d'électricité mis en œuvre étant variables d'un pays à l'autre, pour choisir le mix électrique correspondant à la consommation évitée par la non-production de papier vierge, il faut donc répondre à la question suivante :

Où se situe la production de papier vierge qui sera substituée par la production du papier recyclé ?

Compte tenu de la complexité des marchés mondiaux du bois, de la pâte à papier et du papier, l'étude ne privilégie aucune hypothèse. La démarche adoptée consiste à évaluer 4 scénarios extrêmes, basés chacun sur un moyen de production d'électricité particulier (et non sur une localisation géographique). La réalité aura une position intermédiaire entre ces 4 scénarios extrêmes.

Les mix électriques modélisés sont donc les suivants (pour rappel, il s'agit d'une production « de base ») :

- 100 % nucléaire : la France correspond globalement.
- 100 % charbon : cette situation extrême ne correspond à aucun pays en l'état actuel des prévisions, mais illustre la tendance de pays tels que l'Allemagne (en cas de confirmation de l'abandon du nucléaire)
- 100 % gaz naturel : cette situation extrême ne correspond à aucun pays en l'état actuel des prévisions (tendance en Belgique)
- 100 % renouvelable : cette situation ne correspond à aucun pays en l'état actuel des prévisions (tendance en Espagne)

À titre informatif, la production actuelle de pâte à papier en Europe est située majoritairement en Scandinavie, plus particulièrement en Suède et en Finlande, comme l'indique la figure 13.

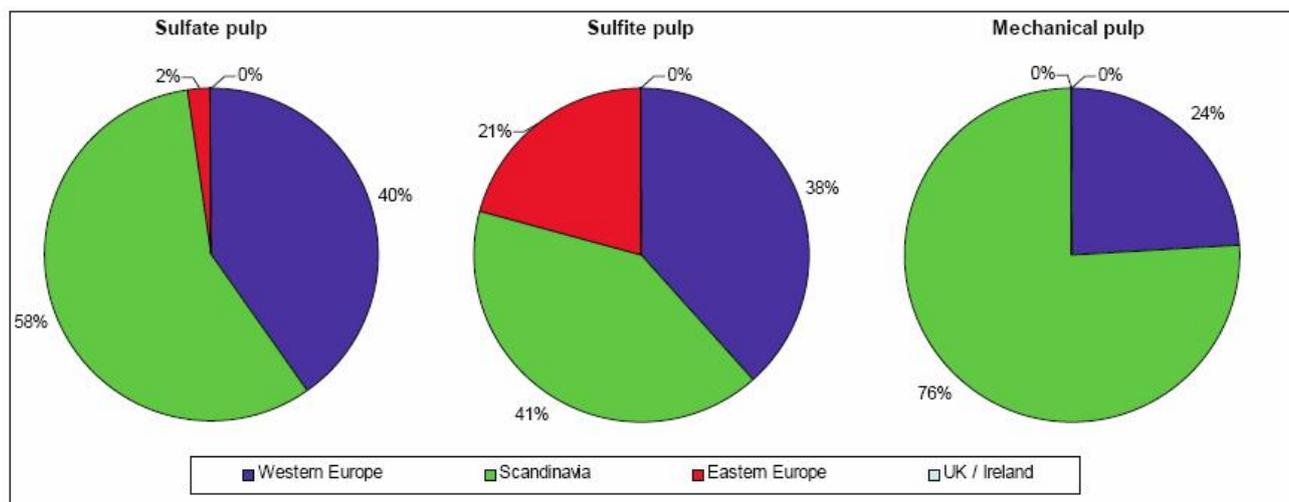


Figure 13 : Répartition géographique de la production de pâte à papier en Europe

Source : Life Cycle Inventories of Packaging and Graphical Papers – Ecolnvent report n°11

Ces pays produisent 58 % et 76 % respectivement de la pâte kraft et de la pâte mécanique. Leurs mix électriques de base actuels se basent majoritairement sur du nucléaire (Finlande) et du renouvelable, hydraulique en particulier (Norvège, Suède). Cependant, la Russie a modifié sa position concernant les exports de bois. Jusqu'ici il s'agissait d'un important pourvoyeur de bois rond mais l'instauration d'une taxe à l'exportation de bois rond (devant atteindre 50 €/m³ d'ici 2011) ainsi qu'un nouveau code forestier ont pour but de favoriser la transformation du bois sur le sol russe, afin d'exporter des produits à valeur ajoutée plus élevée²⁸. Un déplacement vers l'Est du centre de gravité de la production de pâte à papier pourrait donc avoir lieu.

²⁸ Source : Revue annuelle du marché des produits forestiers 2006-2007

Le mix électrique de base russe à long terme est réparti (de façon assez équilibrée) entre le charbon, le nucléaire et le gaz.

C. Mix électrique des consommations des usines de recyclage

Les usines de recyclage de papier ont également des consommations d'électricité, cependant celles-ci diffèrent de la production, du fait d'une localisation géographique différente. Les caractéristiques du type de consommation électrique sont détaillées ci-dessous :

- Ces installations fonctionnent 24 h sur 24, leur consommation d'électricité est donc continue et fera appel à des centrales électriques de base.
- Le recyclage des papiers est considéré comme ayant lieu en Europe, la grande majorité de ceux-ci étant consommés localement, voir Tableau 6.

Le mix électrique correspondant à ces caractéristiques est présenté dans le tableau ci-dessous.

Source d'énergie	Part du mix électrique
Charbon	50,3 %
Nucléaire	49,7 %

Tableau 24 : Mix électrique continu conséquentiel européen

D. Production d'électricité de l'UIOM

La production d'électricité des unités d'incinération d'ordures ménagères (UIOM) injectent de l'électricité sur le réseau. Il faut dans ce cas ne considérer que le réseau français. Les caractéristiques de l'électricité à laquelle se substitue la production des incinérateurs sont détaillées ci-dessous :

- Ces installations fonctionnent 24 h sur 24, elles injectent donc de l'électricité en continu sur le réseau. Leur production électrique se substitue donc à des centrales électriques de base.
- Les installations d'incinération considérées sont celles traitant les déchets français, il s'agit donc d'unités situées en France.

Le mix électrique correspondant à ces caractéristiques est présenté dans le tableau ci-dessous.

Source d'énergie	Part du mix électrique
Nucléaire	100 %

Tableau 25 : Mix électrique continu conséquentiel français

IV.2.6.6 Mix de chaleur substitué

A. Production de chaleur substituée par une production à partir de bois

Lorsque la modélisation se base sur le scénario 2a, le bois économisé par le recyclage est utilisé afin de produire de la chaleur.

Compte tenu de l'aspect mondial du bois et de la complexité de ses mécanismes, la chaleur substituée est produite par un mix moyen européen de production de chaleur (réseaux de chaleurs), très proche du mix moyen mondial.

Une approche conséquentielle nécessiterait idéalement l'utilisation de mix de chaleur conséquentiel à long terme. Cependant les données nécessaires ne sont pas disponibles. Compte tenu de la relative stabilité de ces mix de production de chaleur, un mix moyen actuel est modélisé.

Source d'énergie	Part du mix de chaleur
Charbon	41 %
Gaz	53 %
Fioul	6 %

Tableau 26 : Mix de chaleur moyen européen

B. Production de chaleur renouvelable substituée par une production à partir de bois

Lorsque la modélisation se base sur le scénario 2b, le bois économisé par le recyclage est utilisé pour produire de l'énergie, en compétition au sein des énergies renouvelables.

Nous considérons dans le cas présent que la production de chaleur se substitue à une production par panneaux solaires thermiques.

C. Production de chaleur substituée par la chaleur produite par les incinérateurs

Les UIOM traitant les déchets français injectent la chaleur sur le réseau français, le mix de chaleur à considérer est donc un mix conséquentiel de chaleur pour la France. Cependant, ces données ne sont pas disponibles, le modèle se base donc sur le mix moyen.

Source d'énergie	Part du mix de chaleur
Charbon	11 %
Gaz	70 %
Fioul	19 %

Tableau 27 : Mix de chaleur moyen français

IV.3 Résultats

IV.3.1. Rappels

IV.3.1.1 Scénarios étudiés

Suivant le scénario considéré, la modélisation du bénéfice engendré par une non-consommation de bois grâce au recyclage des PC variera fortement :

- Scénario 1 : Pas de concurrence pour l'accès à la ressource bois. Le bois non-consommé n'est pas utilisé pour autre chose, il n'y a **pas de substitution**. C'est le scénario le plus utilisé dans la littérature.
- Scénario 2a : Concurrence pour l'accès à la ressource bois et ENR compétitives par rapport aux énergies fossiles. Le bois non consommé est utilisé afin de produire de la chaleur. La chaleur produite se substitue à une production de chaleur à base d'**énergie fossile**.
- Scénario 2b : Concurrence pour l'accès à la ressource bois et ENR non compétitives par rapport aux énergies fossiles. Le bois non consommé est utilisé afin de produire de l'énergie. Cette énergie se substitue à de l'énergie produite à partir de **sources renouvelables** (éolien, solaire, ...).

Dans ce rapport, l'utilisation qui est faite du bois libéré grâce au recyclage du papier est appelée "**utilisation alternative du bois**". Cette utilisation alternative est donc le paramètre variable entre les trois scénarios.

IV.3.1.2 Étapes prises en compte dans le modèle

Le modèle correspondant à la décision de recycler une tonne supplémentaire de cartons d'emballages se décompose en plusieurs étapes ou phases.

Elles correspondent soit à des effets engendrés par la décision (et qui sont donc comptabilisés positivement) soit à des effets évités par la décision (comptabilisés négativement). Elles sont décrites dans le tableau ci-dessous :

Phases	Étapes considérées
Transport	Transport entre le centre de tri et l'usine de recyclage
Recyclage du carton	Recyclage en pâte à papier pour produire du Wellenstoff
	Valorisation des rebus (fibres trop courtes ou en paquet)
Production évitée	Fabrication de pâte kraft non-blanchie
Utilisation alternative du bois <i>(dépend du scénario choisi, ci à côté : scénario 2a)</i>	Incinération du bois en chaudière
	Production évitée de chaleur par des sources fossiles
Fin de vie évitée	Élimination en CSDU et/ou incinérateur évitée grâce au recyclage

Tableau 28 : Recyclage des cartons d'emballages – Description des phases

IV.3.1.3 Monétarisation des impacts

Les impacts environnementaux du recyclage sont monétarisés et sont présentés sous forme de "coût environnemental total" et de "coût externe total".

Ces coûts sont exprimés en € 2007 par unité fonctionnelle (1 tonne de cartons d'emballages recyclés)

Une valeur positive indique un coût pour la société et une valeur négative indique un bénéfice pour la société.

IV.3.2. Recyclage de cartons d'emballage (*Mixed grade*)

Unité fonctionnelle = Recyclage d'une tonne de boîtes cartonnées (type boîte de céréales) provenant des ménages pour fabriquer du carton ondulé

IV.3.2.1 Résultats globaux

Les résultats reprenant les différents scénarios et les différents mix sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Mix électrique	Scénario 1	Scénario 2a	Scénario 2b
100 % nucléaire	10 €	- 401 €	86 €
100 % gaz	6 €	- 405 €	82 €
100 % charbon	- 2 €	- 413 €	74 €
100 % renouvelable	29 €	- 383 €	104 €

Tableau 29 : Coût environnemental total du recyclage d'une tonne de cartons d'emballages en carton ondulé

Les résultats sont fortement influencés par les scénarios choisis, à l'inverse, le choix des mix électriques n'a qu'une incidence mineure, hormis (mais dans une moindre mesure) la variante 100 % renouvelable. La figure ci-dessous met en évidence ces ordres de grandeur.

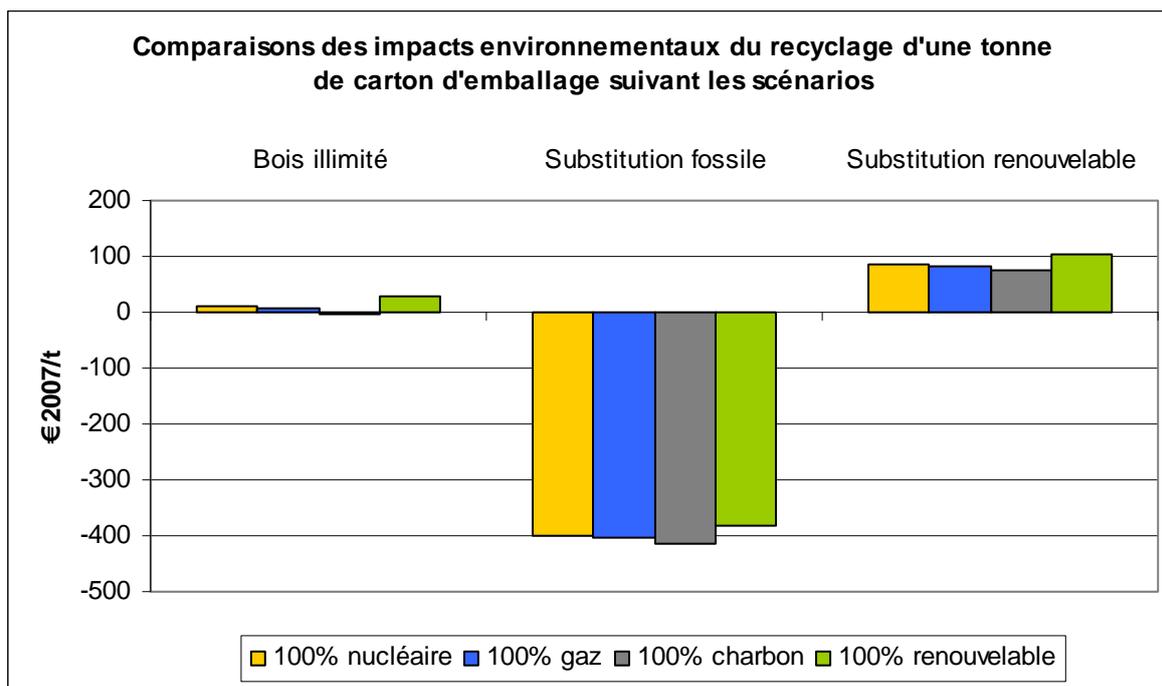


Figure 14 : Impacts monétarisés du recyclage d'une tonne de cartons d'emballage

Sur cette figure, les impacts de chaque combinaison scénario/mix électrique sont exprimés par rapport au scénario 2 avec un mix 100 % nucléaire. On peut établir une tendance pour chaque scénario :

- Dans le cas du scénario 1, le recyclage présente un coût faible.
- Le scénario 2a présente un important bénéfice environnemental, les variations liées au choix du mix électrique sont de l'ordre de 10 %
- Le scénario 2b, correspond à une situation où le recyclage des papiers/cartons représente un coût environnemental modéré

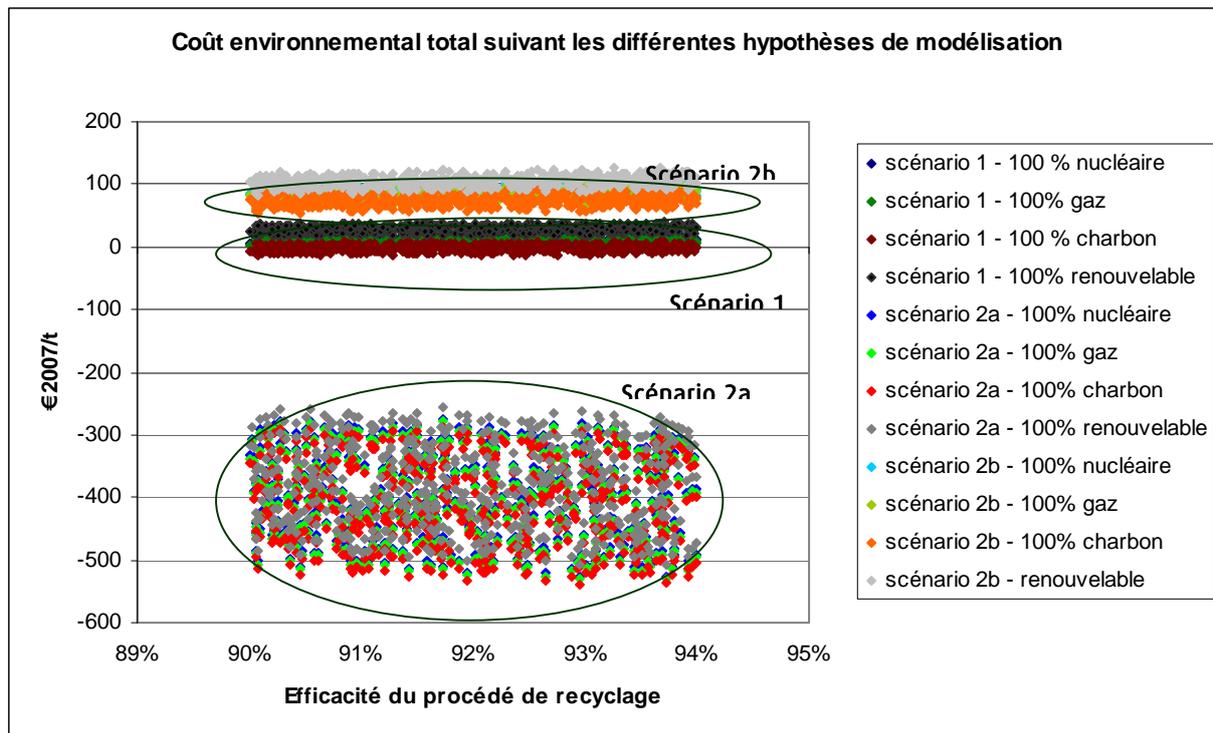


Figure 15 : Coût environnemental total pour l'ensemble des cas étudiés

La figure ci-dessus illustre l'ensemble des couples scénario/mix électrique. Il est possible de distinguer trois nuages de points, correspondant chacun à un scénario :

- Le nuage de points situé entre un coût de - 500 et - 300 € correspond au scénario 2a, où le bois se substitue à de l'énergie fossile ; l'économie d'utilisation de la ressource fossile et les émissions de CO₂ correspondantes sont les avantages principaux.
 - L'épaisseur du nuage de point indique qu'une grande variabilité existe. Il existe au moins un paramètre qui influence fortement les résultats.
- Le nuage de points autour de l'axe des abscisses correspond au scénario 1, où le bois n'est pas valorisé. Le recyclage ne permet pas d'économiser une ressource et en freine même l'exploitation.
- Le nuage de points représentant un coût entre 50 et 100 € correspond au scénario 2b, où le bois remplace une production d'énergie renouvelable.

À l'inverse, le mix électrique n'est pas un facteur assez important pour faire apparaître plusieurs situations. Compte tenu des tendances similaires quel que soit le mix électrique, seul le cas 100 % nucléaire est décomposé par phase et par catégorie d'impacts. Les résultats et les tendances sont alors extrapolables aux autres mix, sachant que ces scénarios jouent sur les émissions de CO₂ fossile.

IV.3.2.2 Résultats dans le cas d'un mix 100 % nucléaire

A. Coût environnemental total

A1. Résultats par étapes

La différence entre les scénarios est liée à l'utilisation alternative du bois. En effet il s'agit du seul paramètre variant d'un scénario à l'autre. La figure ci-dessous met en évidence les points suivants :

- Le recyclage des cartons d'emballages représente un léger coût environnemental lorsque l'on ne considère pas d'utilisation alternative du bois car la ressource en bois est illimitée (scénario 1). La production évitée de pâte vierge engendre un bénéfice environnemental moins important que les impacts de la fin de vie évitée et le recyclage cumulés
- La fin de vie "non recyclage" des cartons présentant un bénéfice environnemental grâce à la récupération d'énergie lors de l'incinération, cette fin de vie évitée grâce au recyclage engendre un impact défavorable pour l'environnement
- L'utilisation alternative du bois engendre des coûts/bénéfices environnementaux d'une amplitude plus importante que n'importe quelle autre phase
- Les transports sont négligeables, quel que soit le scénario considéré

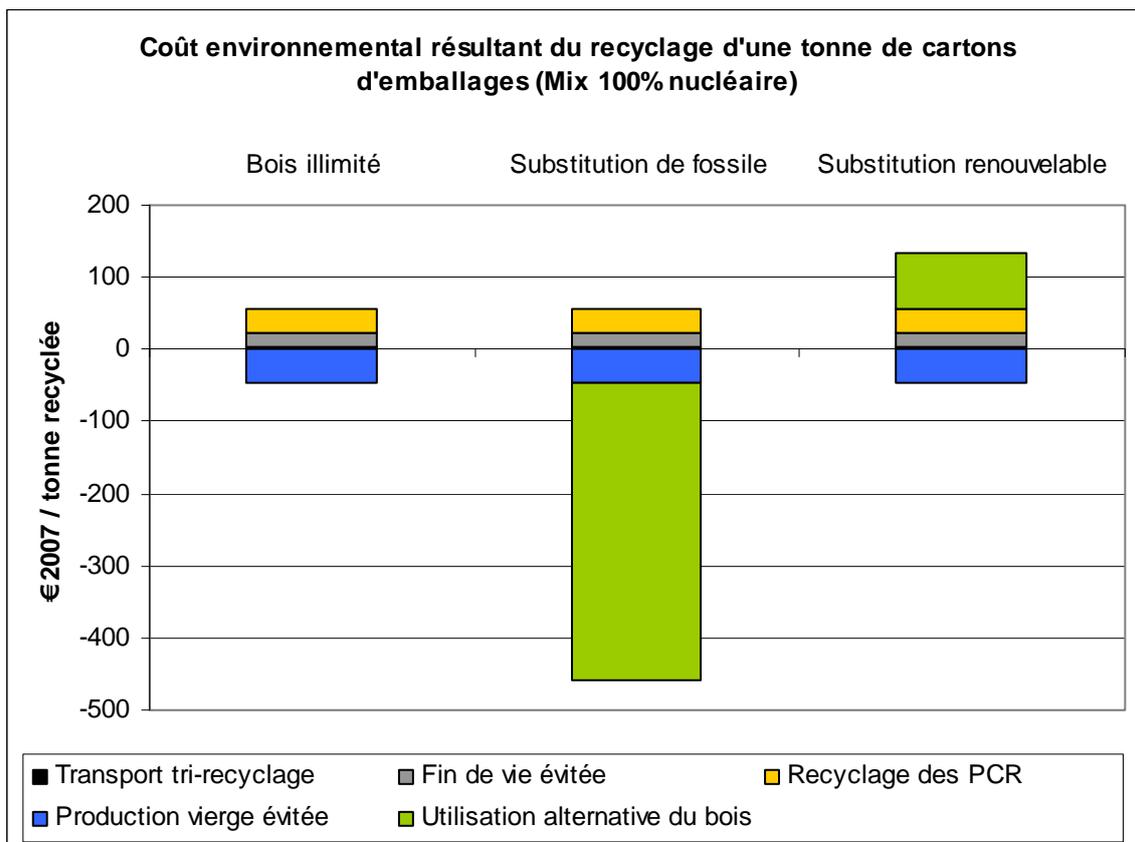


Figure 16 : Coût environnemental total du recyclage d'une tonne de cartons d'emballages, détaillé par phase

Dans le scénario 2a, le bénéfice environnemental de l'utilisation alternative du bois est la somme des impacts du bois brûlé en chaudière et de la production évitée de chaleur à partir de sources fossiles. Dans ce scénario, le bilan est largement favorable.

À l'inverse, le scénario 2b, dont l'utilisation alternative du bois est la somme des impacts du bois brûlé en chaudière et d'une production de chaleur via une source renouvelable, est défavorable. En effet, les impacts du bois brûlé en chaudière sont plus importants que les impacts évités d'une production de chaleur à partir de panneaux solaires thermiques.

Ces deux situations sont détaillées dans les figures ci-dessous.

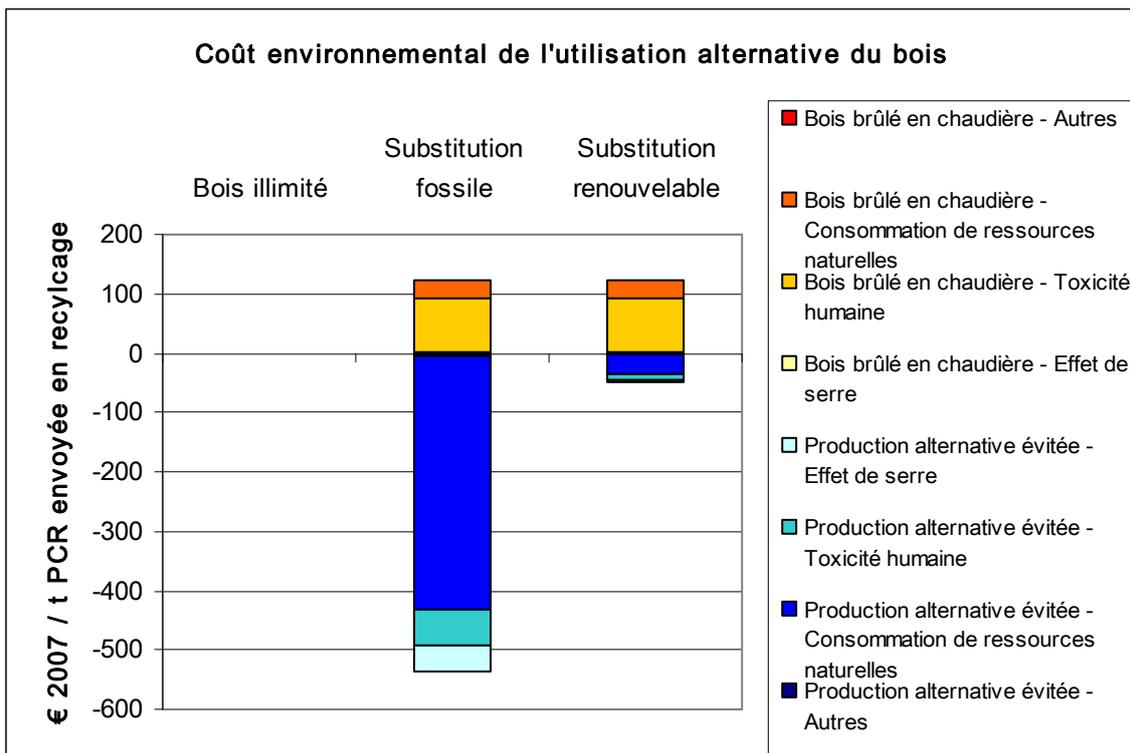


Figure 17 : Coût environnemental de l'utilisation alternative du bois

Les impacts de l'utilisation alternative du bois proviennent essentiellement de la catégorie d'impacts "Toxicité humaine". Les contributions des différents polluants à cette catégorie pour les différentes sources de production de chaleur sont détaillées ci-après.

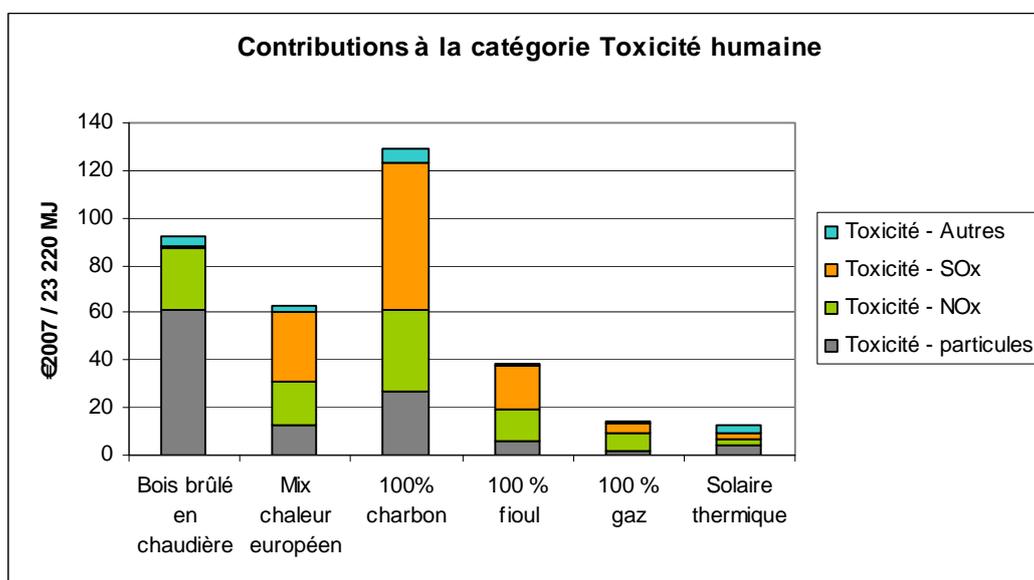


Figure 18 : Contributions à la catégorie "toxicité humaine"

La chaleur produite à partir de bois a un coût plus élevé que la production classique (correspondant au mix des réseaux de chaleur français). Ce coût est en effet plus important que pour la production à partir de gaz et à partir de fioul, en revanche il est inférieur à celui d'une production à partir de charbon.

La chaleur produite à partir de bois présente également un coût plus élevé que la production à partir des ENR. Du point de vue des contributions, les émissions de particules constituent environ 70 % du coût environnemental de la production de chaleur à partir de bois, les oxydes d'azote (NO_x) représentant la majorité du coût restant.

A2. Résultats par catégorie d'impact

Quel que soit le scénario, les catégories d'impact ayant une amplitude suffisante pour influencer sur le résultat final sont :

- La consommation de ressources naturelles, en particulier lorsque l'utilisation alternative du bois remplace de l'énergie fossile (scénario 2a)
- La toxicité humaine
- L'effet de serre

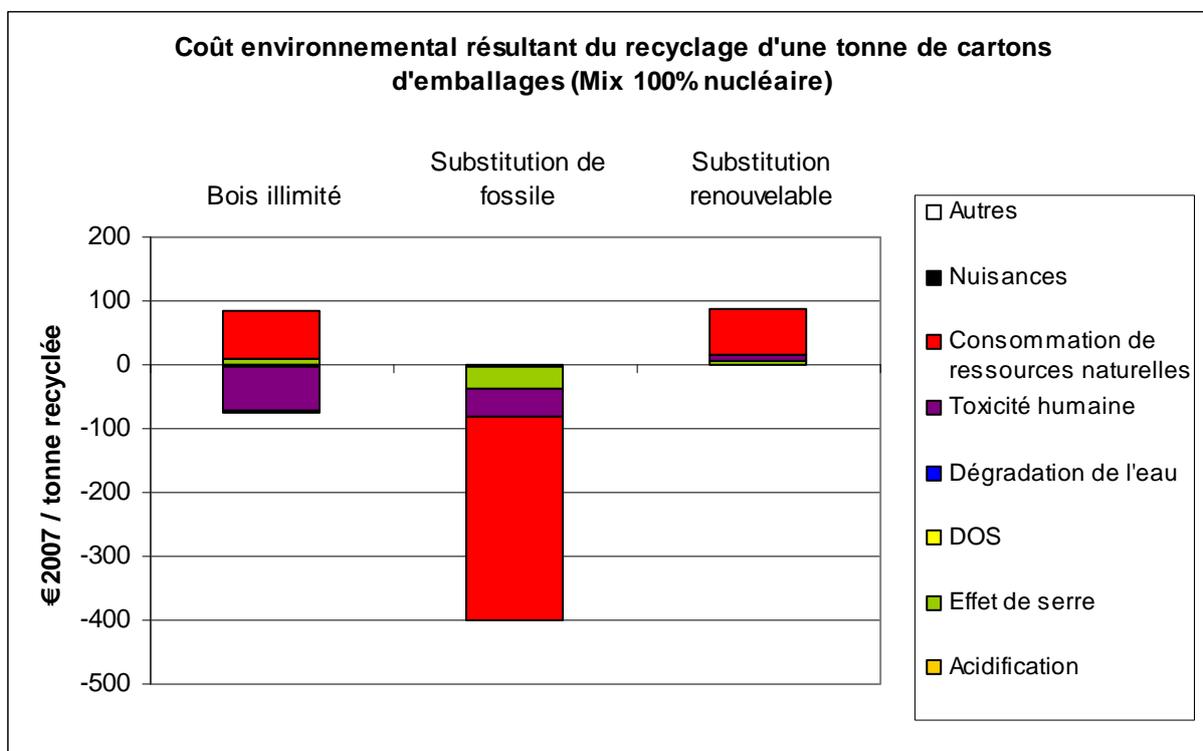


Figure 19 : Coût environnemental total du recyclage d'une tonne de cartons d'emballages, détaillé par catégorie d'impact

Les tableaux ci-dessous présentent la décomposition des impacts par phase et par catégorie d'impact.

Phases	Acidification	Effet de serre	DOS	Dégradation de l'eau	Toxicité humaine	Consommation de ressources naturelles	Nuisances	Autres	Coût environnemental total
Transport tri-recyclage	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	1	2	> -1 et < 1	3
Fin de vie évitée	> -1 et < 1	-28	> -1 et < 1	> -1 et < 1	-3	23	> -1 et < 1	> -1 et < 1	-8
Recyclage des PCR	> -1 et < 1	1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	4	12	> -1 et < 1	> -1 et < 1	18
Production vierge évitée	-1	28	> -1 et < 1	> -1 et < 1	-72	> -1 et < 1	-3	-1	-50
Utilisation alternative du bois	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1
Total	-1	1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	-71	36	> -1 et < 1	-1	-36

Tableau 30 : Décomposition des impacts du recyclage d'une tonne de carton d'emballage, par phase et par catégorie d'impact, cas du scénario 1 (ressource bois illimitée)

Phases	Acidification	Effet de serre	DOS	Dégradation de l'eau	Toxicité humaine	Consommation de ressources naturelles	Nuisances	Autres	Coût environnemental total
Transport tri-recyclage	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	1	2	> -1 et < 1	3
Fin de vie évitée	> -1 et < 1	-28	> -1 et < 1	> -1 et < 1	-3	23	> -1 et < 1	> -1 et < 1	-8
Recyclage des PCR	> -1 et < 1	1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	4	12	> -1 et < 1	> -1 et < 1	18
Production vierge évitée	-1	28	> -1 et < 1	> -1 et < 1	-72	> -1 et < 1	-3	-1	-50
Utilisation alternative du bois	-3	-3	> -1 et < 1	> -1 et < 1	29	-186	> -1 et < 1	1	-161
Total	-4	-1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	-42	-149	> -1 et < 1	> -1 et < 1	-198

Tableau 31 : Décomposition des impacts du recyclage d'une tonne de carton d'emballage, par phase et par catégorie d'impact, cas du scénario 2a (Substitution de fossile)

Phases	Acidification	Effet de serre	DOS	Dégradation de l'eau	Toxicité humaine	Consommation de ressources naturelles	Nuisances	Autres	Coût environnemental total
Transport tri-recyclage	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	1	2	> -1 et < 1	3
Fin de vie évitée	> -1 et < 1	-28	> -1 et < 1	> -1 et < 1	-3	23	> -1 et < 1	> -1 et < 1	-8
Recyclage des PCR	> -1 et < 1	1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	4	12	> -1 et < 1	> -1 et < 1	18
Production vierge évitée	-1	28	> -1 et < 1	> -1 et < 1	-72	> -1 et < 1	-3	-1	-50
Utilisation alternative du bois	2	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	80	-3	> -1 et < 1	1	79
Total	> -1 et < 1	1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	8	33	> -1 et < 1	> -1 et < 1	42

Tableau 32 : Décomposition des impacts du recyclage d'une tonne de carton d'emballage, par phase et par catégorie d'impact, cas du scénario 2b (Substitution de renouvelable)

Concernant la catégorie effet de serre :

- Le fait d'éviter une incinération ou une mise en CSDU engendre un gain environnemental. En effet, ces fins de vie engendrent des émissions de CO₂ biogénique (incinération et CSDU) et de méthane biogénique (en faible quantité pour la part envoyée en CSDU). Pour rappel, la dégradation du papier en CSDU est considérée comme étant de 27 % à un horizon temporel de 100 ans.
- La production de pâte vierge permet des gains en termes d'émissions de gaz à effet de serre :
 - La production de pâte engendre des surplus d'énergie injectés sur les réseaux. Ceux-ci se substituent aux moyens de production classiques et représentent donc un bénéfice environnemental. La production évitée engendre donc un coût environnemental.
 - Note : Tout le carbone biogénique n'est pas relâché lors du procédé de production et la pâte à papier comporte encore une part importante du carbone capté lors de la croissance du bois (ce carbone est relâché lors de l'incinération et – partiellement – lors de la mise en CSDU, voir point précédent).
- Les impacts de l'utilisation alternative du bois dépendent de ce à quoi il se substitue. Le bois brûlé en chaudière a un cycle quasiment neutre (à l'exception des émissions liées au débardage et aux transports du bois), le carbone émis lors de la combustion correspondant au carbone capté lors de la croissance des arbres.

Ainsi, seule la source de chaleur évitée a un impact. Dans le cas d'une substitution de fossile, le bénéfice environnemental est conséquent ; à l'inverse, il est quasiment nul lorsque le bois brûlé remplace une source de chaleur renouvelable (panneaux solaires thermiques).

Concernant la catégorie toxicité :

- La production évitée de pâte vierge permet un bénéfice environnemental important. Les autres étapes hors utilisation alternative n'ont que des impacts d'une ampleur réduite.
- Les impacts de l'utilisation alternative du bois sont globalement défavorables. La production de chaleur à partir de bois a un coût environnemental plus élevé que les productions alternatives, qu'il s'agisse de sources renouvelables (écart très important) ou de sources fossiles (écart modéré). Cette tendance est liée aux importantes émissions de particules et d'oxydes d'azote de la production de chaleur à partir de bois.

Concernant les consommations de ressources naturelles :

- La fin de vie évitée représente un coût environnemental. La production de chaleur et d'électricité liée à la fin de vie (incinération) doit être compensée par des productions alternatives, qui consomment des ressources naturelles.
- Le procédé de recyclage des cartons d'emballages engendre des consommations de ressources naturelles, en particulier de ressources fossiles, pour la production de chaleur.
- La production vierge évitée a globalement un impact neutre, les surplus d'énergie provenant du bois lors de la production de papier (injectés sur les réseaux) compensant les consommations énergétiques de cette production.
- L'utilisation alternative du bois engendre un bénéfice environnemental. La source de chaleur substituée joue un rôle déterminant dans le bénéfice. Dans le cas d'une substitution de renouvelable, celui-ci est quasiment nul, alors qu'il est très important lorsque le bois se substitue à une source d'énergie fossile.

Concernant la catégorie nuisances :

- De manière générale, les nuisances n'ont qu'un impact très limité, cependant il convient de rappeler que seules les nuisances liées aux transports sont prises en compte (voir chapitre II.2.6). Ainsi, les nuisances liées aux usines ne sont pas prises en compte, notamment celles liées aux odeurs.

Les principales origines d'impacts favorables ou défavorables pour chaque scénario sont données dans le tableau ci-dessous.

	Éviter la fin de vie	Éviter la production vierge	Utilisation alternative du bois	Bilan global
Scénario 1 : bois illimité	Favorable à l'effet de serre (évite émissions de l'incinération et des CSDU) Défavorable en consommation de ressource (pas de production de chaleur de l'incinérateur) Neutre (ou très faible impact) pour les autres catégories	Défavorable à l'effet de serre : pas de carbone biogénique capté par la production de pâte Neutre en terme de consommation de ressources : les surplus d'énergie compensent les consommations Favorable pour la toxicité (pas de consommation de produit chimique)	Non concerné	Légèrement défavorable Effet de serre : neutre Toxicité : favorable Consommation de ressources : défavorable
Scénario 2a : substitution énergie fossile	Favorable à l'effet de serre (évite émissions de l'incinération et des CSDU) Défavorable en consommation de ressource (pas de production de chaleur de l'incinérateur) Neutre (ou très faible impact) pour les autres catégories	Défavorable à l'effet de serre : pas de carbone biogénique capté par la production de pâte Neutre pour la consommation de ressource : les surplus d'énergie compensent les consommations Favorable pour la toxicité (pas de consommation de produit chimique)	Très légèrement favorable à l'effet de serre Très favorable aux consommations de ressources (pas de ressources fossiles utilisées) Défavorable pour la toxicité (émissions de particules et de NO _x plus importantes que les chaudières classiques)	Très favorable Effet de serre : légèrement favorable Toxicité : neutre Consommation de ressource : très favorable
Scénario 3 : substitution énergie renouvelable	Favorable à l'effet de serre (évite émissions de l'incinération et des CSDU) Défavorable en consommation de ressource (pas de production de chaleur de l'incinérateur) Neutre (ou très faible impact) pour les autres catégories	Défavorable à l'effet de serre : pas de carbone biogénique capté par la production de pâte Neutre pour la consommation de ressource : les surplus d'énergie compensent les consommations Favorable pour la toxicité (pas de consommation de produit chimique)	Neutre pour l'effet de serre Neutre pour les consommations de ressources Très défavorable pour la toxicité (émissions importantes de particules et de NO _x)	Défavorable Effet de serre : légèrement défavorable Défavorable pour la toxicité Consommation de ressource : défavorable

Tableau 33 : Principaux contributeurs au bilan global des scénarios

B. Coût externe

Le coût externe diffère du coût environnemental total pour les catégories d'impact suivantes :

- Effet de serre, où le CO₂ fossile est internalisé (marché des quotas de CO₂)
- Consommation de ressources naturelles, qui est partiellement internalisé (prix de l'énergie)

Le coût environnemental externe du recyclage d'une tonne de carton d'emballage, pour différentes combinaisons scénario/mix électrique, est présenté dans le tableau ci-dessous.

Mix électrique	Scénario 1	Scénario 2a	Scénario 2b
100 % nucléaire	- 36 €	- 198 €	42 €
100 % gaz	- 38 €	- 201 €	41 €
100 % charbon	- 44 €	- 207 €	35 €
100 % renouvelable	- 28 €	- 191 €	51 €

Tableau 34 : Coût environnemental externe du recyclage de cartons d'emballages en carton ondulés

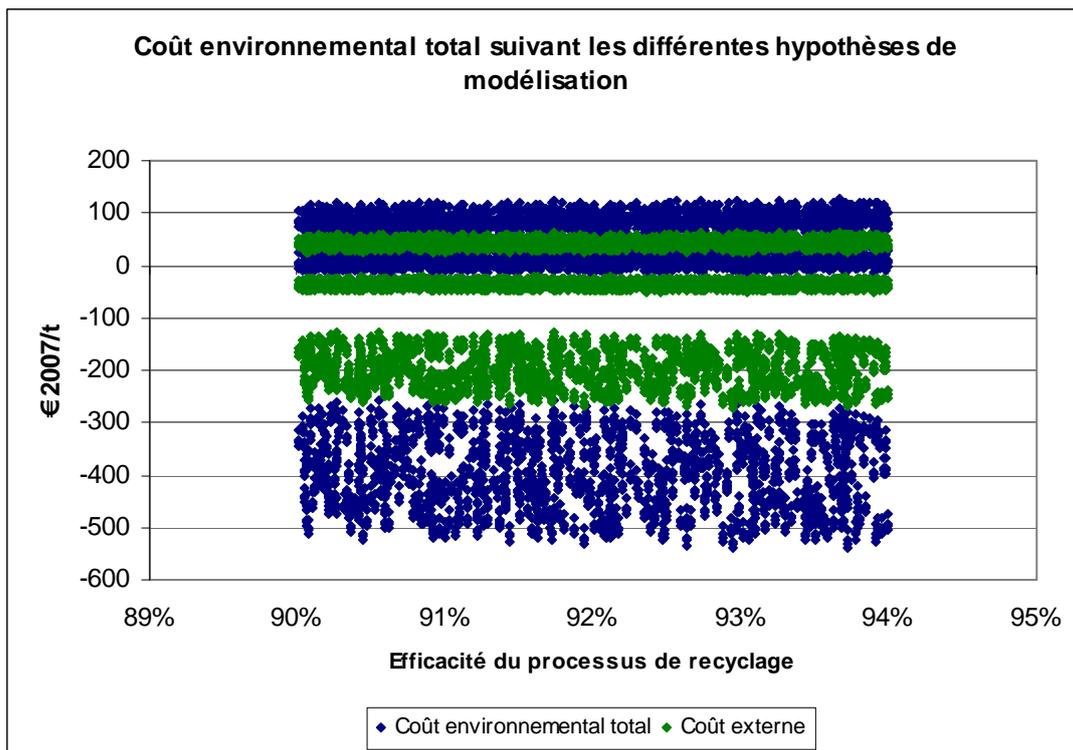


Figure 20 : Coût environnemental total et externe pour l'ensemble des couples scénario/mix électrique
En pratique, les coûts internalisés sont :

- Pour les émissions de gaz à effet de serre, seul le CO₂ fossile est internalisé. Celui-ci provient de la combustion d'énergie fossile.
 - Ce point est important uniquement dans le scénario 2a. Le bénéfice environnemental est en partie internalisé ; en conséquence, le coût externe du recyclage augmente.
 - Dans les autres scénarios, les émissions de CO₂ biogénique (donc non-internalisées) sont largement supérieures aux émissions de CO₂ fossile.
- Les consommations de ressources naturelles sont internalisées en moyenne à hauteur de 50 % du coût environnemental. Les coûts internalisés sont donc d'autant plus importants que le coût environnemental total lié à la consommation de ressources est élevé, ce qui est particulièrement le cas du scénario 2a.

La contribution relative de la catégorie d'impact toxicité augmente toutefois étant donné qu'aucun impact n'est internalisé.

Dans l'ensemble, la structure des coûts externes n'est pas modifiée en profondeur par rapport aux coûts environnementaux totaux. Les catégories d'impacts et les phases ayant une influence importante sur le coût environnemental total restent les plus influentes en ce qui concerne le coût environnemental externe. Notons que pour le scénario 1, la catégorie toxicité devient la plus impactante.

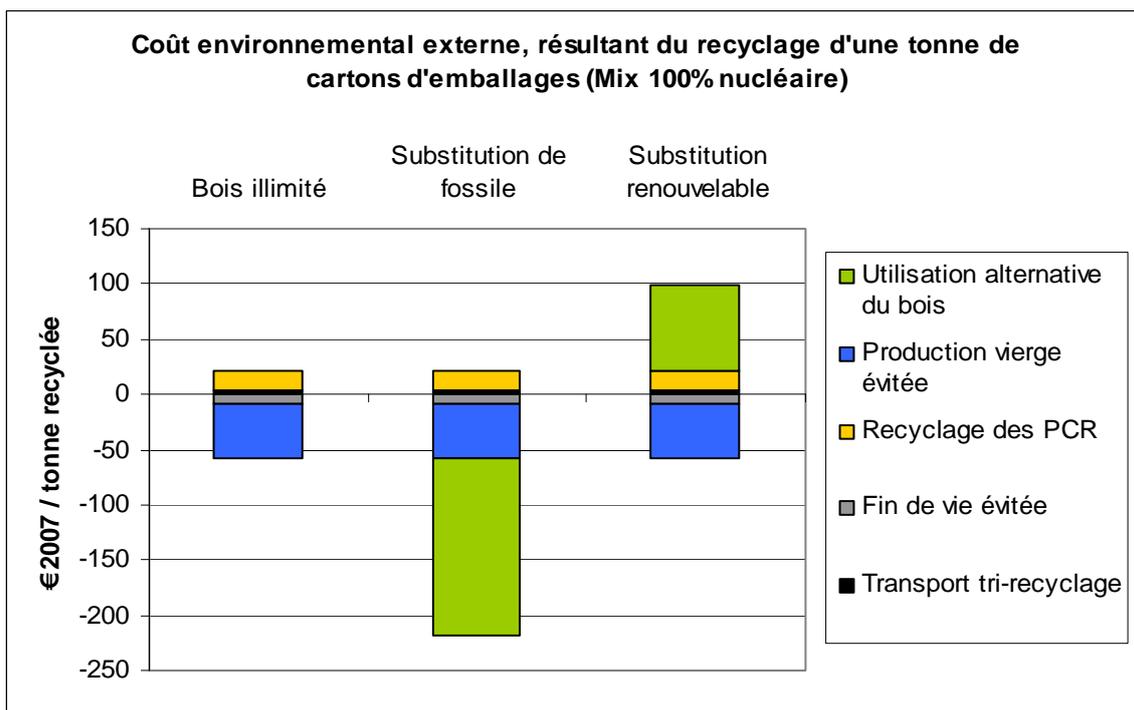


Figure 21 : Coût externe du recyclage d'une tonne de cartons d'emballages, détaillé par phase

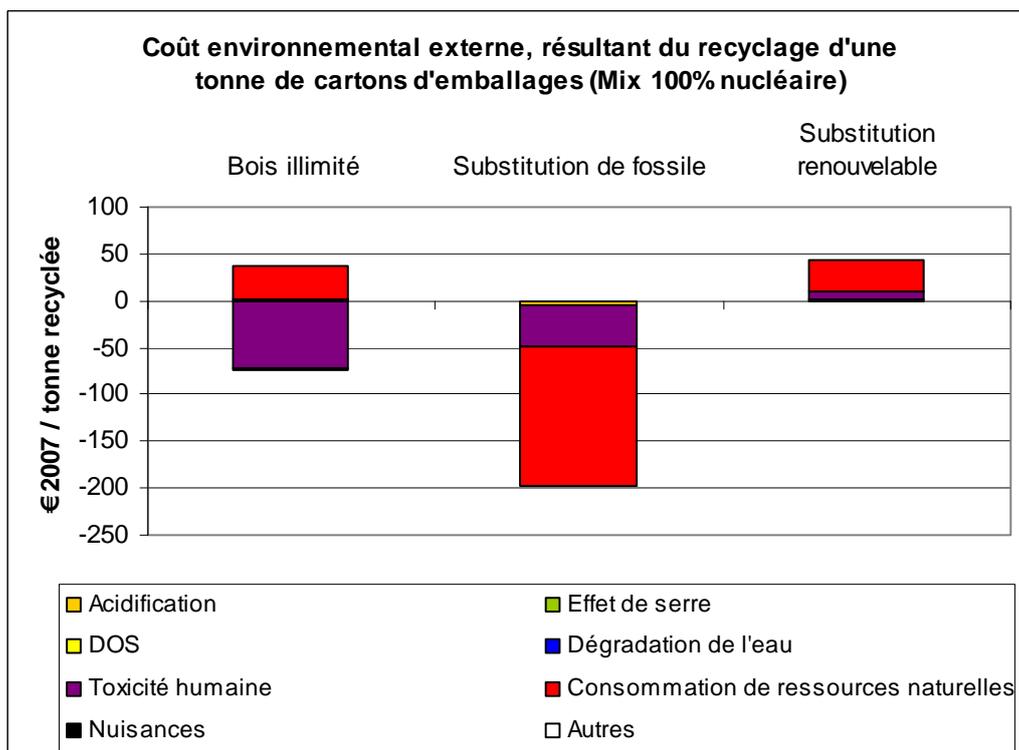


Figure 22 : Coût externe du recyclage d'une tonne de cartons d'emballages, détaillé par catégorie d'impact

IV.3.2.3 Analyse de sensibilité des résultats

Outre les 3 scénarios et les mix électriques, l'influence de différents paramètres sur le bilan du recyclage est également testée.

Le tableau ci-dessous indique l'influence d'une variation réaliste des paramètres du modèle sur les résultats :

Paramètre	Intervalle de valeurs du modèle	Influence
Rendement des chaudières au bois	55 à 85 %	Forte (2a)
Rendement de l'incinération de fin de vie évitée	40 % à 95 %	Forte
Consommation électrique du procédé de recyclage	150 à 250 kWh/t output	Moyenne
Efficacité de recyclage (rendement)	90 à 94 %	Faible (intervalle restreint)
Élimination des boues de recyclage	100% incinération	Très faible

Tableau 35 : Influence des paramètres

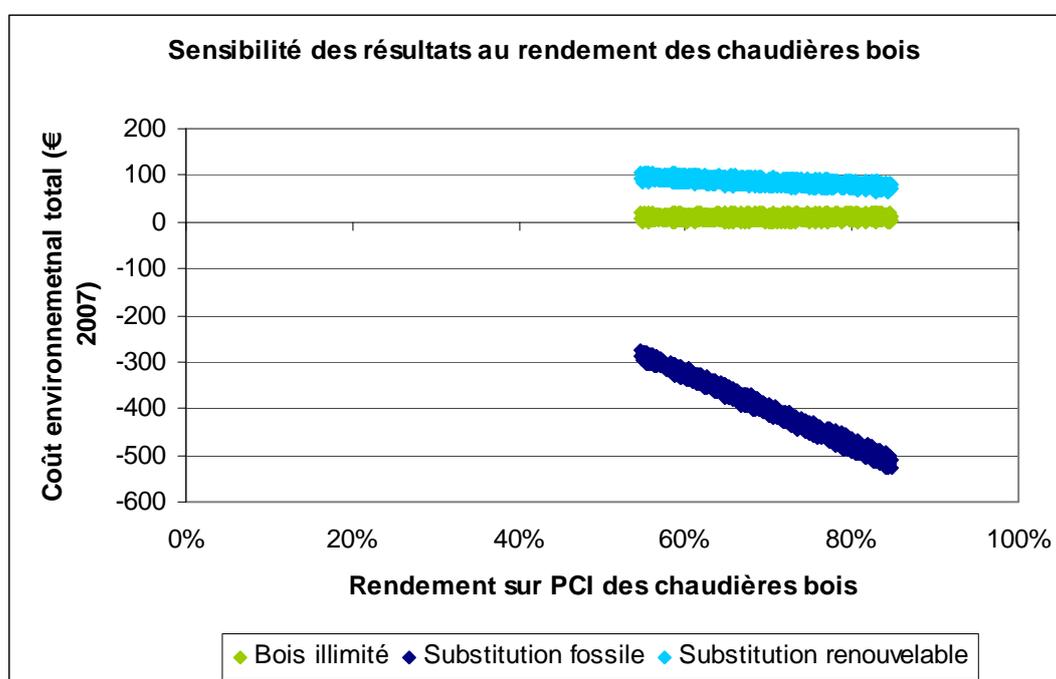


Figure 23 : Sensibilité des résultats au rendement des chaudières bois

Dans le modèle, les chaudières bois sont considérées comme ayant un rendement de 70 % sur PCI. Il s'agit de la valeur des procédés d'EcolInvent utilisés :

- heat, softwood logs, at furnace 100 kW
- heat, hardwood logs, at furnace 100 kW

Ce paramètre est particulièrement influent pour le scénario 2a où le bois non utilisé remplace une production de chaleur par des sources d'énergie fossile. Il n'a aucune influence sur le scénario 1.

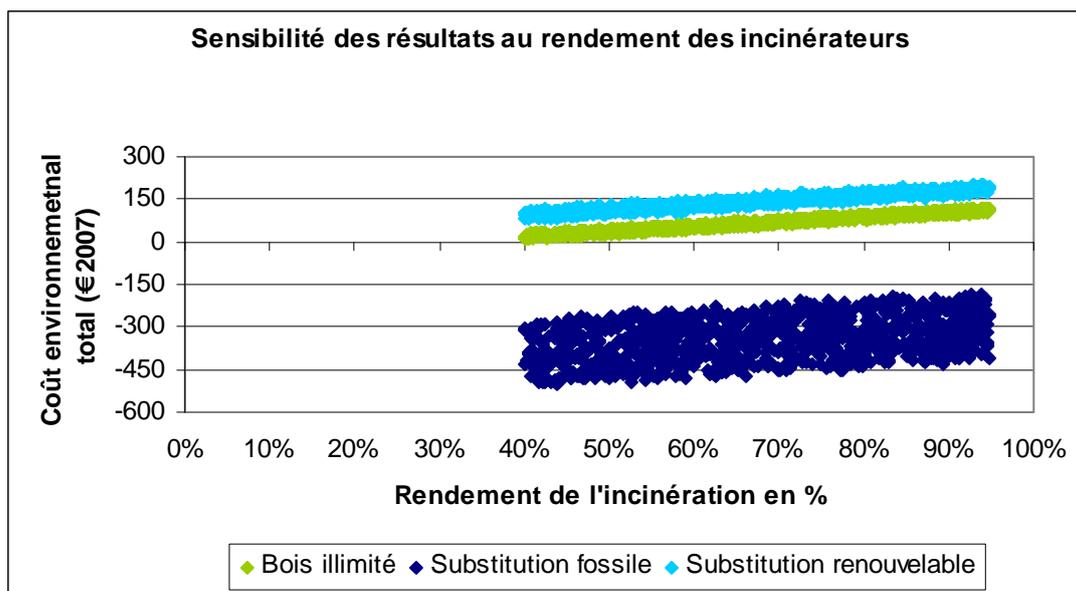


Figure 24 : Sensibilité des résultats à la fin de vie évitée

La figure ci-dessus explore le cas hypothétique d'une fin de vie en élimination correspondant à une incinération à haut rendement. Celle-ci est modélisée en considérant une incinération basée uniquement sur une production de chaleur, dont le rendement varie de 40 % (ce qui correspond à la situation actuelle pour des incinérateurs produisant uniquement de la chaleur) à 95 % (ce qui correspond à un rendement similaire à des installations de production de chaleur basées sur du fioul ou du gaz).

Le bénéfice environnemental du recyclage est plus faible dans le cas d'un haut rendement. En effet, l'incinération devenant de plus en plus bénéfique lorsque le rendement augmente, la fin de vie évitée engendre de plus en plus d'impacts. Cependant, les tendances restent similaires, les scénarios 1 et 2b représentant un coût environnemental et le scénario 2a engendrant un gain environnemental.

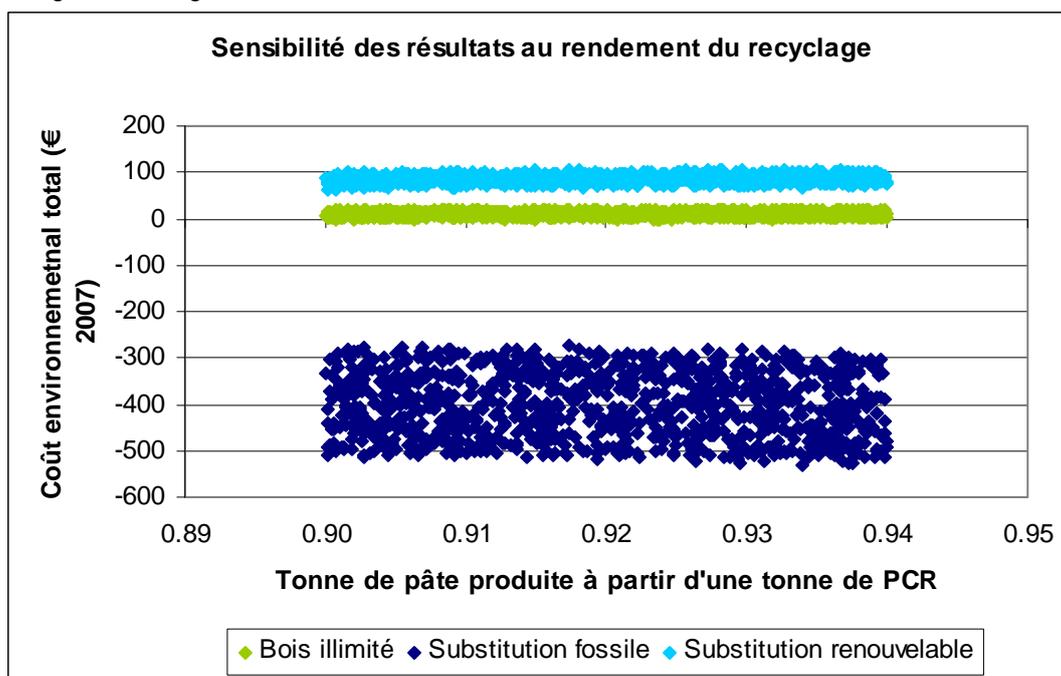


Figure 25 : Sensibilité des résultats au rendement du recyclage

La modélisation du recyclage des cartons d'emballages en carton ondulé considère un intervalle de valeurs très étroit pour le rendement du recyclage. Dès lors, les résultats sont peu influencés par ce paramètre.

Le scénario 2a est le plus sensible à cette variation, la production évitée de chaleur par des sources fossiles étant proportionnelle au rendement du recyclage.

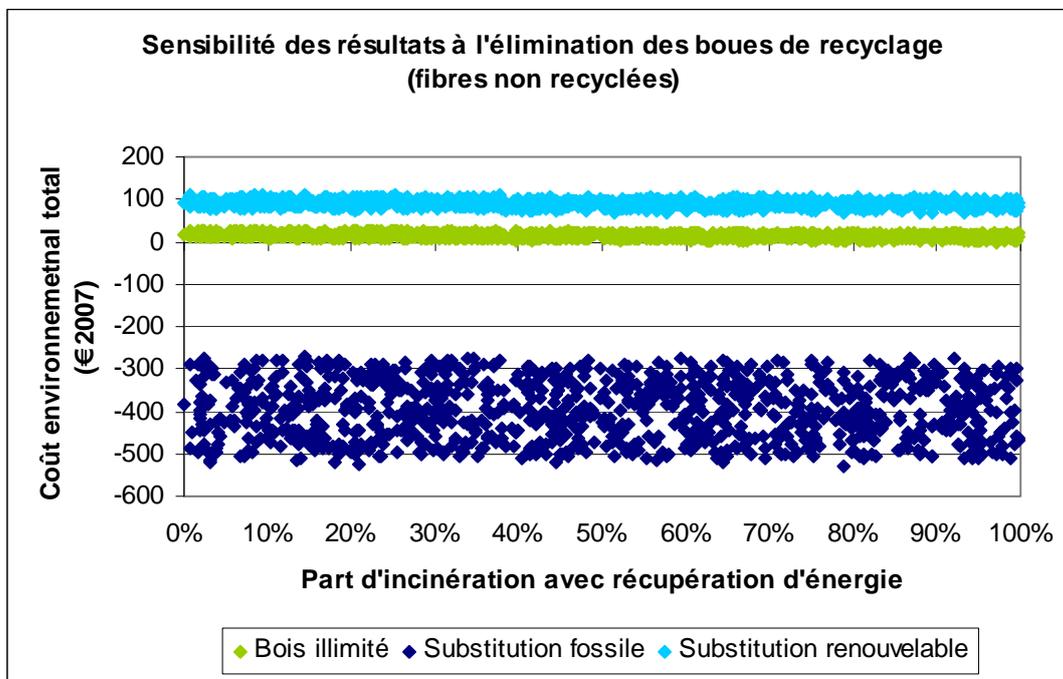


Figure 26 : Sensibilité des résultats à la fin de vie des boues de recyclage

Le type d'élimination des boues de recyclage influe très peu sur le coût environnemental total. Les impacts sont très légèrement plus favorables lorsque les boues sont incinérées avec récupération de chaleur.

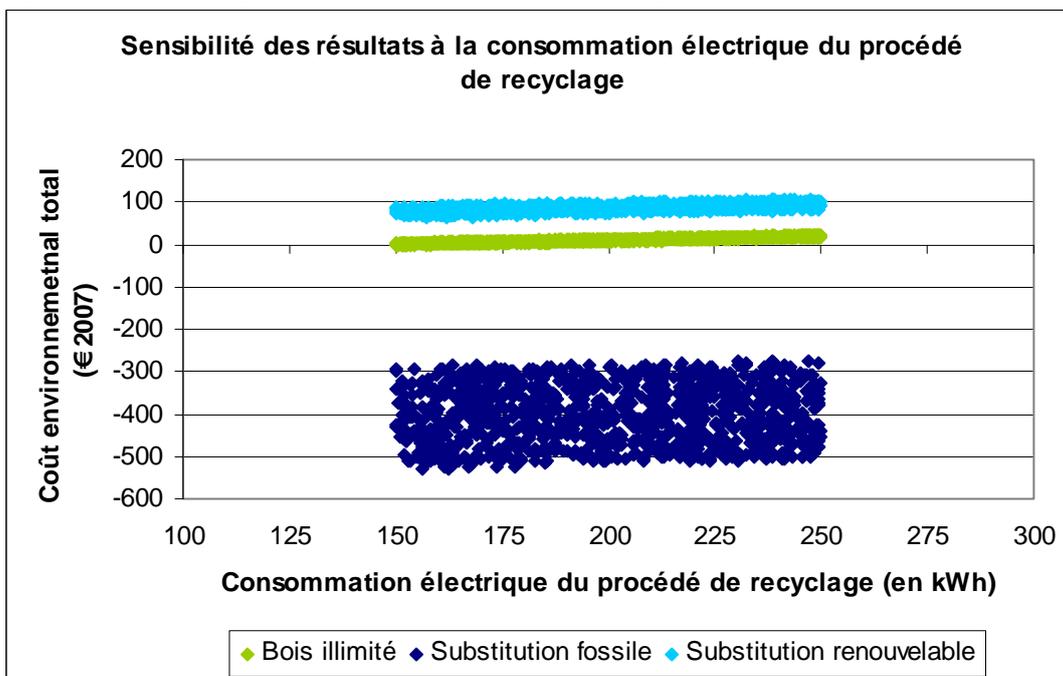


Figure 27 : Sensibilité des résultats à la consommation d'électricité du procédé de recyclage

Les consommations du procédé de recyclage influencent le résultat de façon modérée. Pour un champ de valeur allant de 150 à 250 kWh par tonne recyclée, l'écart de coût environnemental total est d'environ 30 €.

IV.3.2.4 Variantes liées à la monétarisation de l'effet de serre

Ces variantes portent sur deux paramètres :

- Cas de base :
 - Le coût environnemental lié aux émissions de CO₂ est internalisé à 100 % pour le CO₂ et à 0 % pour les autres GES.
 - La tonne de CO₂ vaut 20 €
- Variation sur le degré d'internalisation (ne concerne que le coût externe) :
 - 0 % du coût environnemental des émissions de GES sont internalisés
 - 100 % du coût environnemental des émissions de GES sont internalisé
- Variation sur le facteur de monétarisation des émissions de GES²⁹ :
 - La tonne de CO₂ vaut 50 €
 - La tonne de CO₂ vaut 96 €

Le tableau ci-dessous se base sur les données pour un mix électrique 100 % nucléaire.

Scénario	Coût de la tonne de CO ₂ équivalent		Coût environnemental total	Coût externe		
				0% d'internalisation pour tous les GES	100% d'internalisation CO ₂ , 0% pour autres GES	100% d'internalisation pour tous les GES
Scénario 1 : ressources en bois illimitées	Objectif Kyoto	20 €/t CO ₂ eq.	10 €	- 30 €	- 36 €	- 38 €
	Objectif durabilité, valeur basse	50 €/t CO ₂ eq.	22 €	- 18 €	- 35 €	- 38 €
	Objectif durabilité, valeur haute	96 €/t CO ₂ eq.	41 €	1 €	- 32 €	- 38 €
Scénario 2a : Substitution d'énergie fossile	Objectif Kyoto	20 €/t CO ₂ eq.	- 401 €	- 229 €	- 198 €	- 196 €
	Objectif durabilité, valeur basse	50 €/t CO ₂ eq.	-450 €	- 278 €	- 199 €	- 196 €
	Objectif durabilité, valeur haute	96 €/t CO ₂ eq.	-525 €	- 353 €	- 202 €	- 196 €
Scénario 2b : Substitution d'énergie renouvelable	Objectif Kyoto	20 €/t CO ₂ eq.	86 €	49 €	42 €	41 €
	Objectif durabilité, valeur basse	50 €/t CO ₂ eq.	97 €	60 €	44 €	41 €
	Objectif durabilité, valeur haute	96 €/t CO ₂ eq.	114 €	77 €	47 €	41 €

Tableau 36 : Résultats selon la monétarisation de l'effet de serre

Le tableau ci-dessus montre que la valeur du facteur de monétarisation des GES peut influencer fortement le coût environnemental total et le coût environnemental externe en cas d'internalisation nulle ou limitée au CO₂.

Pour les scénarios 1 et 2b, l'internalisation des coûts liés aux GES engendre une diminution du coût (ou une augmentation du gain, suivant les cas) liés au recyclage. À l'inverse, dans le scénario 2a, l'internalisation des émissions engendre un coût externe plus élevé (bénéfice moins important). Ceci est lié au fait que la substitution de sources de chaleur fossiles par le bois permet une diminution des émissions de CO₂ fossile et donc un gain environnemental. Lorsque ce gain est internalisé, le coût externe augmente.

²⁹ Ces valeurs sont discutées plus en détails au point II.2.4.

IV.3.2.5 Variantes liées à la monétarisation des consommations des ressources énergétiques

Cette variante porte sur deux paramètres :

- La valeur du facteur de monétarisation, qui varie de 20 % par rapport à la valeur du Guide de monétarisation
- Le taux d'internalisation des coûts environnementaux liés à la consommation d'énergie, sur base de trois valeurs du baril de pétrole :
 - Le baril est à 64 \$, ce qui est la valeur retenue dans le Guide de monétarisation
 - Le baril est à 100 \$, ce qui correspond à la valeur courant septembre 2008
 - Le baril est à 150 \$, ce qui correspond à une hypothèse de prix élevés à long terme (record de 147 \$ en juillet 2008)
- Les résultats de ces variations sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Scénario	Valeur du facteur de monétarisation	Coût environnemental total	Coût externe		
			Baril à 64 \$	Baril à 100 \$	Baril à 150 \$
Scénario 1 : ressources en bois illimitées	0,012 €/MJ	- 5 €	- 51 €	- 73 €	- 73 €
	0,015 €/MJ	10 €	- 36 €	- 60 €	- 73 €
	0,018 €/MJ	25 €	- 20 €	- 43 €	- 73 €
Scénario 2a : Substitution d'énergie fossile	0,012 €/MJ	- 337 €	- 138 €	- 48 €	- 48 €
	0,015 €/MJ	- 401 €	- 198 €	- 102 €	- 48 €
	0,018 €/MJ	- 465 €	- 267 €	- 171 €	- 48 €
Scénario 2b : Substitution d'énergie renouvelable	0,012 €/MJ	72 €	29 €	9 €	9 €
	0,015 €/MJ	86 €	42 €	21 €	9 €
	0,018 €/MJ	100 €	58 €	37 €	9 €

Tableau 37 : Résultats selon la monétarisation des consommations d'énergie

Remarque :

Dans certaines configurations, le coût interne de la consommation d'énergie dépasse le coût environnemental total. Les chiffres présentés reposent sur le principe qu'un coût internalisé ne peut dépasser (en valeur absolue) le coût environnemental total. Le taux d'internalisation est plafonné à 100 % (voir section II.2.5.2).

IV.3.3. Recyclage des journaux des ménages (*newspapers & magazines*)

Unité fonctionnelle = Recyclage d'une tonne de journaux issus des ménages pour fabriquer du papier journal

IV.3.3.1 Résultats globaux

Les résultats reprenant les différents scénarios et les différents mix sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Mix électrique	Scénario 1	Scénario 2a	Scénario 2b
100 % nucléaire	- 102 €	- 291 €	- 66 €
100 % gaz	- 158 €	- 347 €	- 122 €
100 % charbon	- 263 €	- 452 €	- 227 €
100 % renouvelable	+ 141 €	- 48 €	+ 177 €

Tableau 38 : Coût environnemental total du recyclage de journaux et magazines en pâte à journal

Les résultats sont fortement influencés par les scénarios choisis, mais aussi par le choix des mix électriques. Cette différence par rapport au recyclage des autres PCR s'explique par la pâte vierge remplacée (pâte thermo-mécanique), qui nécessite une très importante consommation électrique. La figure ci-dessous met en évidence ces ordres de grandeur.

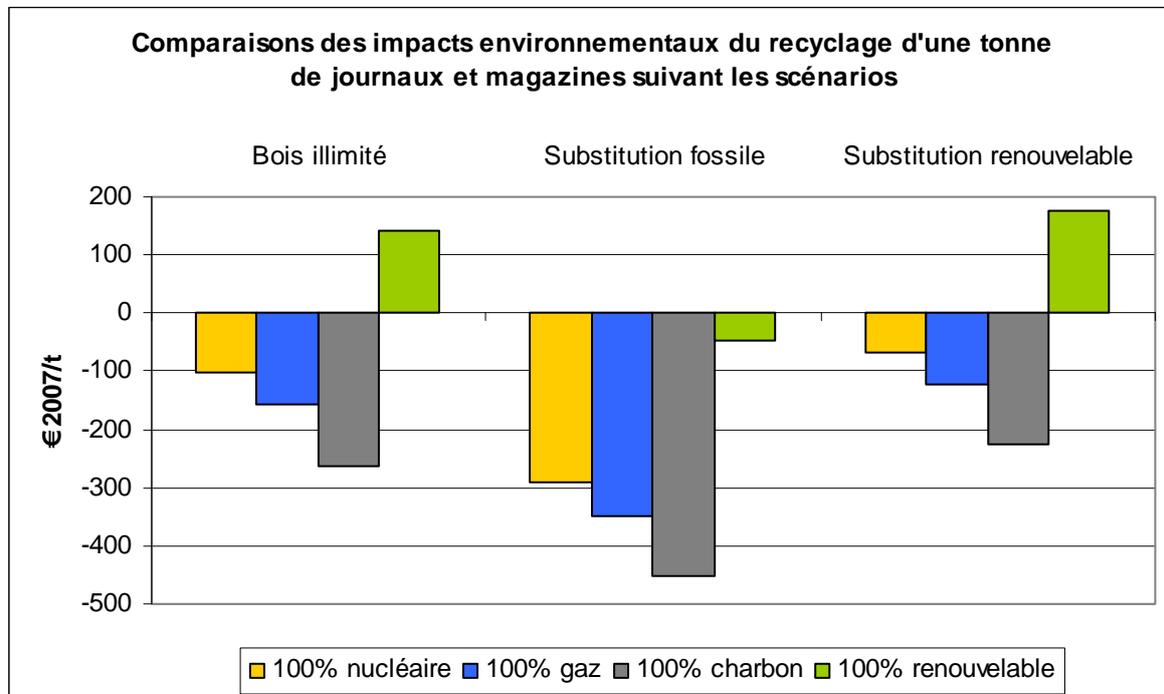


Figure 28 : Impacts monétarisés du recyclage d'une tonne de journaux et magazines

Sur cette figure, les impacts de chaque combinaison scénario/mix électrique sont exprimés par rapport au scénario 2a avec un mix 100 % nucléaire. Les grandes tendances de cette figure sont :

- L'importance du mix électrique considéré

La production évitée de pâte vierge permet une non consommation d'électricité importante, qui rend le choix du mix électrique déterminant dans les résultats. Pour un même scénario, le coût environnemental total peut varier du simple à plus du double ; dans les cas des scénarios 1 et 2b, l'utilisation du mix ENR ayant même des résultats opposés aux autres mix (fossiles et nucléaire).

- Les scénarios ont un coût moyen différent

Le scénario 2a, où le bois non utilisé se substitue à une source de chaleur fossile, présente le bénéfice environnemental moyen le plus important. Les scénarios 1 et 2b engendrent également des bénéfices, ceux-ci sont néanmoins d'une plus faible amplitude.

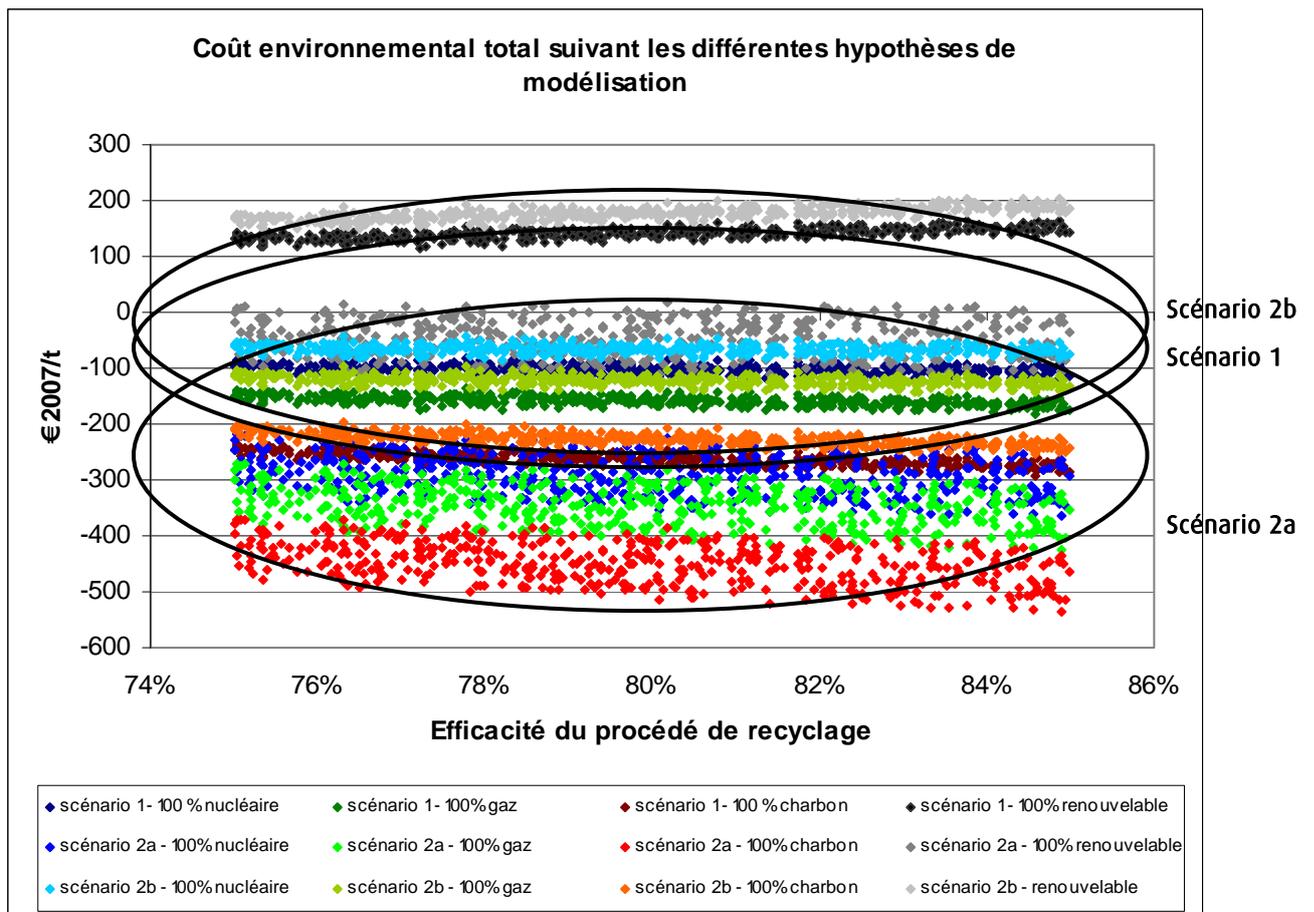


Figure 29 : Coût environnemental total pour l'ensemble des cas étudiés

La figure ci-dessus illustre l'ensemble des couples scénario/mix électrique. Le choix du scénario et du mix influence fortement la valeur du bilan environnemental. Mais pour un mix énergétique donné, la hiérarchie entre les 3 scénarios est la même et pour un scénario donné, la hiérarchie entre les mix énergétique est identique également.

Ce graphique met également en évidence des résultats relativement proches pour les mix électriques nucléaire, gaz et charbon, au sein d'un même scénario. À l'inverse, le mix électrique renouvelable se détache nettement, ayant un coût environnemental plus élevé (ou un bénéfice moindre).

Compte tenu des comportements similaires pour les mix électriques nucléaire, gaz et charbon, seul le mix 100 % nucléaire est décomposé par phase et par catégorie d'impact. Les résultats et les tendances sont alors extrapolables aux cas gaz et charbon, sachant que ces scénarios jouent sur les émissions de CO₂ fossile.

Le cas du mix renouvelable étant notoirement différent, il est également décomposé par phase et par catégorie d'impact.

IV.3.3.2 Coût environnemental total

A. Résultats par étapes

La différence entre les scénarios est liée à l'utilisation alternative du bois, en effet il s'agit du seul paramètre variant d'un scénario à l'autre. La figure ci-dessous met en évidence les points suivants :

- La production évitée de pâte thermo-mécanique engendre un bénéfice environnemental conséquent
- L'utilisation alternative du bois engendre des coûts (ou bénéfices) environnementaux d'une amplitude importante

- Les transports sont négligeables, quel que soit le scénario considéré

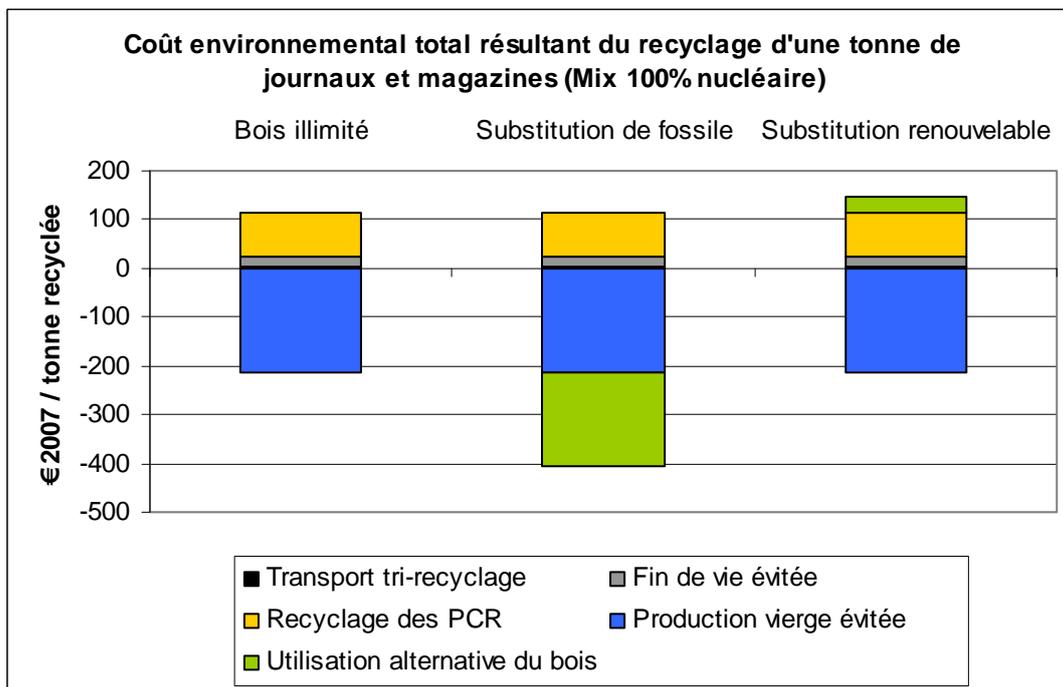


Figure 30 : Coût environnemental total du recyclage d'une tonne de journaux et magazines, détaillé par phase (mix 100 % nucléaire)

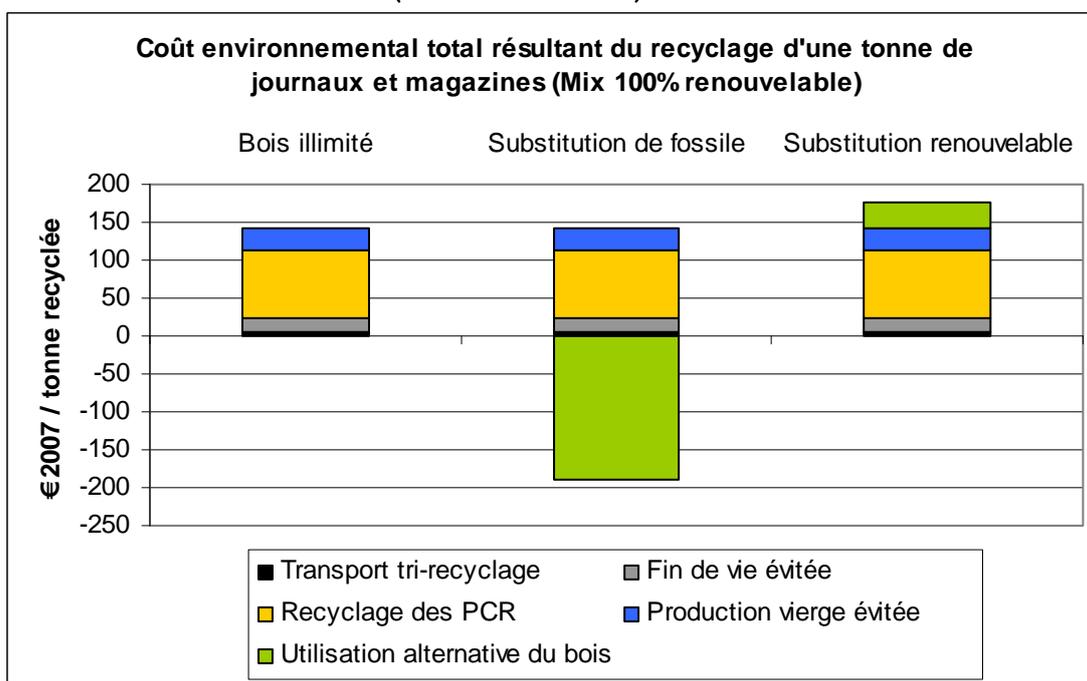


Figure 31 : Coût environnemental total du recyclage d'une tonne de journaux et magazines, détaillé par phase (mix 100 % renouvelable)

Dans le scénario 2a, le bénéfice environnemental de l'utilisation alternative du bois est la somme des impacts du bois brûlé en chaudière et de la production évite de chaleur à partir d'une source fossile. Dans ce cadre, le bilan est largement favorable, voir Figure 28.

Le coût environnemental du recyclage, hors utilisation alternative du bois dépend du mix électrique considéré. La figure ci-dessous présente les coûts environnementaux totaux du scénario 2a, par étape, en fonction des mix électriques. Le mix n'a d'influence que sur la production évitée, néanmoins il s'agit d'une étape ayant un impact environnemental important, du fait de sa forte consommation électrique.

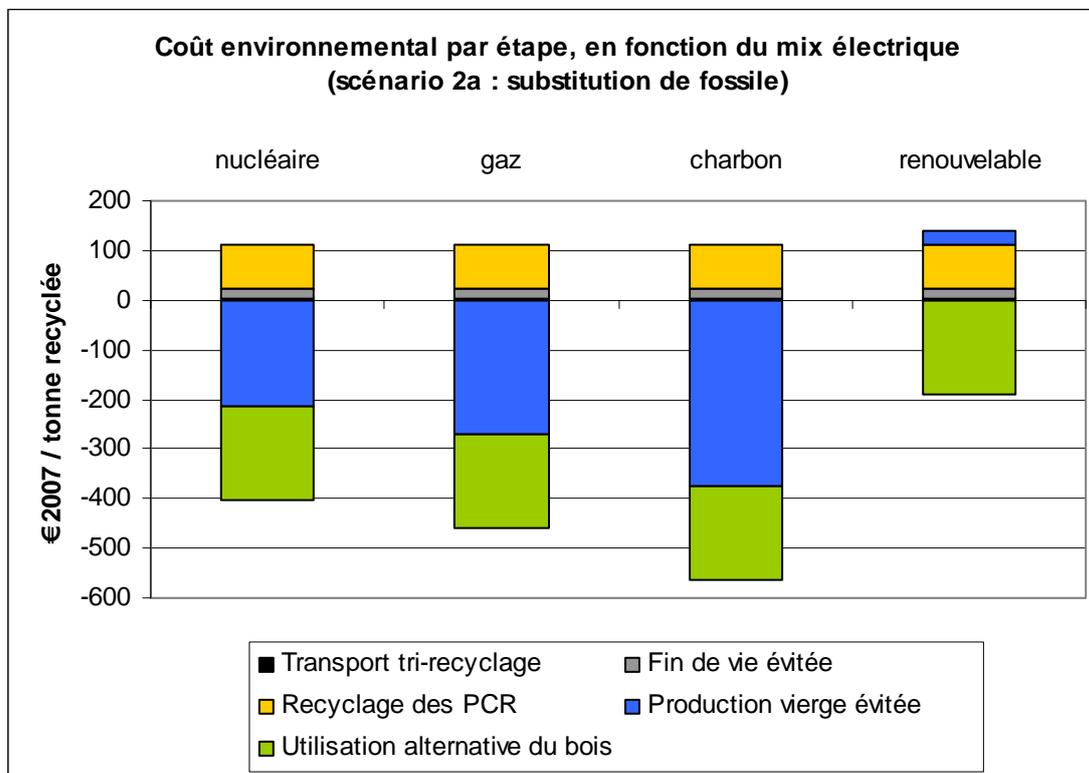


Figure 32 : Coût environnemental total du recyclage d'une tonne de journaux et magazines, détaillé par phase, en fonction des mix électriques

La production de pâte thermo-mécanique consomme une quantité importante d'électricité mais produit un surplus de chaleur. Ainsi, lorsque l'électricité n'a qu'un coût environnemental très faible (cas de 100 % de renouvelable), la production de papier à partir de vierge engendre un gain environnemental. La production vierge évitée devient donc un coût.

B. Résultats par catégorie d'impacts

Quel que soit le scénario, les catégories d'impact ayant une amplitude suffisante pour influencer sur le résultat final sont :

- La consommation de ressources naturelles, en particulier lorsque l'utilisation alternative du bois remplace de l'énergie fossile (scénario 2a)
- La toxicité humaine
- L'effet de serre

Les résultats pour les mix électriques à base d'énergie fossile et nucléaire sont relativement similaires, par opposition avec les résultats obtenus pour mix renouvelable.

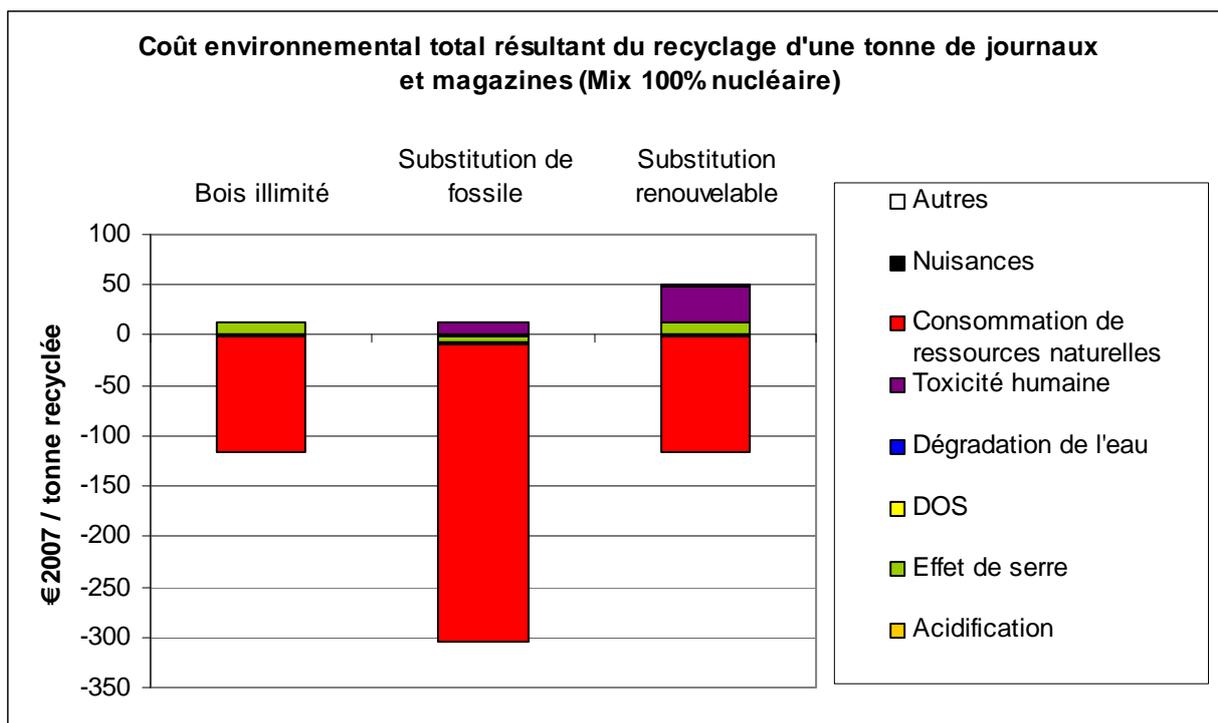


Figure 33 : Coût environnemental total du recyclage d'une tonne de journaux, détaillé par catégorie d'impact (mix 100 % nucléaire)

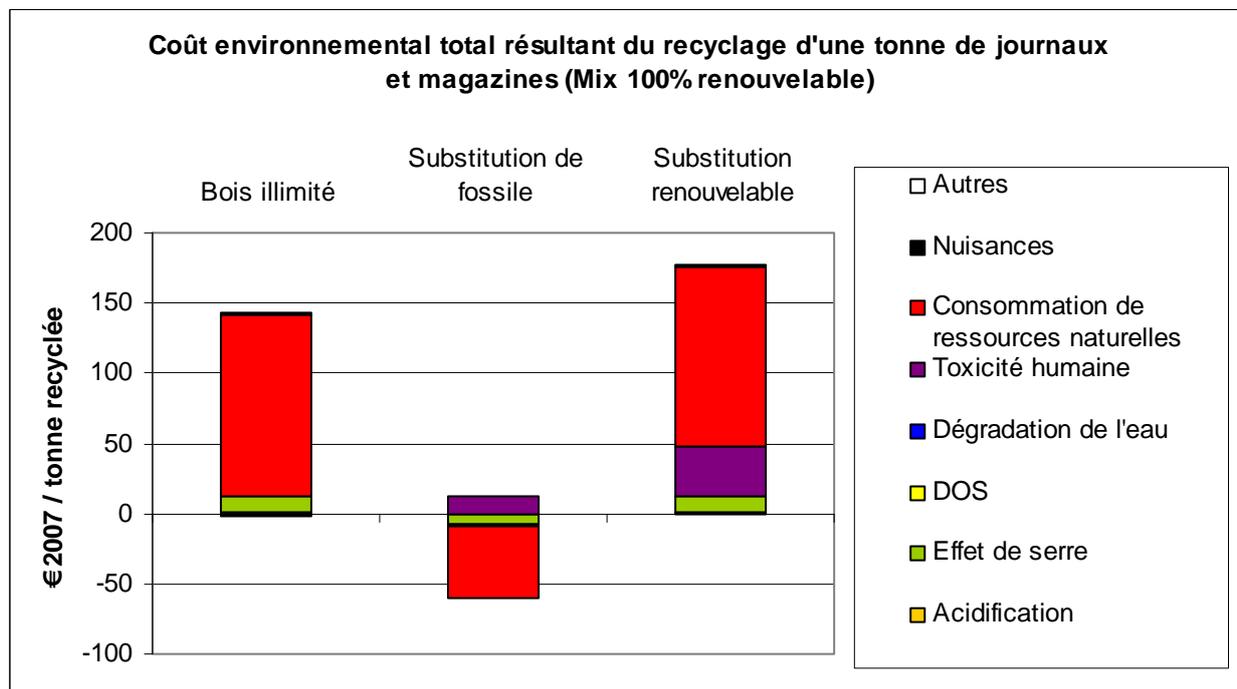


Figure 34 : Coût environnemental total du recyclage d'une tonne de journaux, détaillé par catégorie d'impact (mix 100 % renouvelable)

Les tableaux ci-dessous présentent la décomposition des impacts par phase et par catégorie d'impact.

Scénario 1 : bois illimité :

Phases	Acidification	Effet de serre	DOS	Dégradation de l'eau	Toxicité humaine	Consommation de ressources naturelles	Nuisances	Autres	Coût environnemental total
Transport tri-recyclage	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	2	2	> -1 et < 1	4
Fin de vie évitée	> -1 et < 1	-26	> -1 et < 1	-1	-3	49	> -1 et < 1	> -1 et < 1	20
Recyclage des PCR	1	7	> -1 et < 1	> -1 et < 1	13	67	> -1 et < 1	> -1 et < 1	88
Production vierge évitée	-1	30	> -1 et < 1	> -1 et < 1	-11	-231	-1	> -1 et < 1	-215
Utilisation alternative du bois	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1
Total	> -1 et < 1	12	> -1 et < 1	-1	-1	-114	1	> -1 et < 1	-102

Tableau 39 : Décomposition des impacts du recyclage d'une tonne de journaux, par phase et par catégorie d'impact (scénario 1, mix électrique 100 % nucléaire)

Phases	Acidification	Effet de serre	DOS	Dégradation de l'eau	Toxicité humaine	Consommation de ressources naturelles	Nuisances	Autres	Coût environnemental total
Transport tri-recyclage	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	2	2	> -1 et < 1	4
Fin de vie évitée	> -1 et < 1	-26	> -1 et < 1	-1	-3	49	> -1 et < 1	> -1 et < 1	20
Recyclage des PCR	1	7	> -1 et < 1	> -1 et < 1	13	67	> -1 et < 1	> -1 et < 1	88
Production vierge évitée	-1	30	> -1 et < 1	> -1 et < 1	-12	13	-1	> -1 et < 1	29
Utilisation alternative du bois	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1
Total	> -1 et < 1	12	> -1 et < 1	-1	-1	130	1	> -1 et < 1	141

Tableau 40 : Décomposition des impacts du recyclage d'une tonne de journaux, par phase et par catégorie d'impact (scénario 1, mix électrique 100 % renouvelable)

Les résultats de la catégorie d'impacts « Consommation de ressources naturelles » sont opposés dans les cas d'un mix 100 % renouvelable, du fait de l'impact négligeable des consommations électriques dans ce 2^e cas :

- Le procédé de recyclage consomme de l'électricité et de la chaleur (mix européens)
- La fin de vie évitée engendre une consommation de ressources fossiles (pour palier la non production d'électricité et de chaleur des incinérateurs)
- L'impact de la consommation électrique de la production évitée de pâte vierge dépend du mix électrique considéré. Dans le cas d'un mix fossile ou nucléaire, cette production évitée engendre un bénéfice. Dans le cas d'un mix ENR, la production évitée engendre un coût et non pas un bénéfice car la production de pâte vierge produit un surplus d'énergie qui n'est donc plus disponible.

Scénario 2a : bois utilisé en substitution d'énergie fossile

Phases	Acidification	Effet de serre	DOS	Dégradation de l'eau	Toxicité humaine	Consommation de ressources naturelles	Nuisances	Autres	Coût environnemental total
Transport tri-recyclage	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	2	2	> -1 et < 1	4
Fin de vie évitée	> -1 et < 1	-26	> -1 et < 1	-1	-3	49	> -1 et < 1	> -1 et < 1	20
Recyclage des PCR	1	7	> -1 et < 1	> -1 et < 1	13	67	> -1 et < 1	> -1 et < 1	88
Production vierge évitée	-1	30	> -1 et < 1	> -1 et < 1	-12	13	-1	> -1 et < 1	29
Utilisation alternative du bois	-2	-19	> -1 et < 1	> -1 et < 1	13	-182	> -1 et < 1	> -1 et < 1	-189
Total	-1	-7	> -1 et < 1	-1	12	-53	1	> -1 et < 1	-48

Tableau 41 : Décomposition des impacts du recyclage d'une tonne de journaux, par phase et par catégorie d'impact (scénario 2a, mix 100 % nucléaire)

Phases	Acidification	Effet de serre	DOS	Dégradation de l'eau	Toxicité humaine	Consommation de ressources naturelles	Nuisances	Autres	Coût environnemental total
Transport tri-recyclage	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	2	2	> -1 et < 1	4
Fin de vie évitée	> -1 et < 1	-26	> -1 et < 1	-1	-3	49	> -1 et < 1	> -1 et < 1	20
Recyclage des PCR	1	7	> -1 et < 1	> -1 et < 1	13	67	> -1 et < 1	> -1 et < 1	88
Production vierge évitée	-1	30	> -1 et < 1	> -1 et < 1	-11	-231	-1	> -1 et < 1	-215
Utilisation alternative du bois	-2	-19	> -1 et < 1	> -1 et < 1	13	-181	> -1 et < 1	-1	-189
Total	-1	-7	> -1 et < 1	-1	12	-295	1	-1	-291

Tableau 42 : Décomposition des impacts du recyclage d'une tonne de journaux, par phase et par catégorie d'impact (scénario 2a, mix 100 % renouvelable)

Les résultats de la catégorie d'impacts « Consommation de ressources naturelles » suivent la même tendance quel que soit le mix électrique, néanmoins le cas du 100 % renouvelable est plus tempéré :

- Le procédé de recyclage consomme de l'électricité et de la chaleur (mix européens)
- La fin de vie évitée engendre une consommation de ressources fossiles (pour palier la non-production d'électricité et de chaleur des incinérateurs)
- L'utilisation alternative du bois permet une importante économie de ressources naturelles (fossiles en l'occurrence) qui compensent à elle seule les consommations engendrées par le recyclage et la fin de vie évitée
- La consommation électrique de la production évitée de pâte vierge ne fait qu'accentuer la tendance. Dans le cas du mix renouvelable, cette étape n'a que peu de poids, pour les autres mix, le bénéfice environnemental supplémentaire est conséquent

Scénario 2b : bois utilisé en substitution d'énergie renouvelable

Phases	Acidification	Effet de serre	DOS	Dégradation de l'eau	Toxicité humaine	Consommation de ressources naturelles	Nuisances	Autres	Coût environnemental total
Transport tri-recyclage	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	2	2	> -1 et < 1	4
Fin de vie évitée	> -1 et < 1	-26	> -1 et < 1	-1	-3	49	> -1 et < 1	> -1 et < 1	20
Recyclage des PCR	1	7	> -1 et < 1	> -1 et < 1	13	67	> -1 et < 1	> -1 et < 1	88
Production vierge évitée	-1	30	> -1 et < 1	> -1 et < 1	-12	13	-1	> -1 et < 1	29
Utilisation alternative du bois	1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	36	-1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	36
Total	1	12	> -1 et < 1	-1	35	129	1	> -1 et < 1	177

Tableau 43 : Décomposition des impacts du recyclage d'une tonne de journaux, par phase et par catégorie d'impact (scénario 2b, mix 100 % nucléaire)

Phases	Acidification	Effet de serre	DOS	Dégradation de l'eau	Toxicité humaine	Consommation de ressources naturelles	Nuisances	Autres	Coût environnemental total
Transport tri-recyclage	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	2	2	> -1 et < 1	4
Fin de vie évitée	> -1 et < 1	-26	> -1 et < 1	-1	-3	49	> -1 et < 1	> -1 et < 1	20
Recyclage des PCR	1	7	> -1 et < 1	> -1 et < 1	13	67	> -1 et < 1	> -1 et < 1	88
Production vierge évitée	-1	30	> -1 et < 1	> -1 et < 1	-11	-231	-1	> -1 et < 1	-215
Utilisation alternative du bois	1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	36	-1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	36
Total	1	12	> -1 et < 1	-1	36	-116	1	> -1 et < 1	-66

Tableau 44 : Décomposition des impacts du recyclage d'une tonne de journaux, par phase et par catégorie d'impact (scénario 2b, mix 100 % renouvelable)

Les résultats de la catégorie d'impacts « Consommation de ressources naturelles » suivent la même tendance que pour le scénario 1. L'utilisation alternative du bois n'engendre que de très faibles bénéfices environnementaux pour la catégorie ressources naturelles. Le résultat global dépend alors fortement du mix électrique évité de la production de pâte vierge.

Concernant la catégorie gaz à effet de serre :

- La fin de vie évitée engendre un gain environnemental. En effet, le recyclage évite des émissions de CO₂ biogénique et de méthane biogénique (en faible quantité, pour la part envoyée en CSDU)
- La production de pâte vierge évitée engendre un coût environnemental. Au stade de pâte, le papier garde une part importante de carbone capté dans le bois.
- Les impacts de l'utilisation alternative du bois dépendent de ce à quoi il se substitue. Le bois brûlé en chaudière a un cycle quasiment neutre (à l'exception des émissions liées au débardage et aux transports du bois), le carbone émis lors de la combustion correspondant au carbone capté lors de la croissance des arbres.
- Ainsi, seule la source de chaleur évitée a un impact. Dans le cas d'une substitution de fossile, le bénéfice environnemental est conséquent ; à l'inverse, il est quasiment nul lorsque le bois brûlé remplace une source de chaleur renouvelable (panneaux solaires thermiques)

Concernant la catégorie toxicité :

- La production évitée de pâte vierge permet un bénéfice environnemental modéré, du même ordre que le coût environnemental du procédé de recyclage. Les autres étapes hors utilisation alternative n'ont que des impacts d'une ampleur réduite.
- La production de chaleur à partir de bois a un coût environnemental plus élevé que les productions alternatives, qu'il s'agisse de sources renouvelables (écart très important) ou de sources fossiles (écart modéré).

Concernant la catégorie nuisances :

- De manière générale, les nuisances n'ont qu'un impact très limité, cependant il convient de rappeler que seules les nuisances liées aux transports sont prises en compte (voir chapitre II.2.6). Ainsi, les nuisances liées aux usines ne sont pas prises en compte.

Les principales origines d'impacts favorables ou défavorables pour chaque scénario sont données dans le tableau ci-dessous.

	Fin de vie évitée	Production vierge évitée	Utilisation alternative du bois	Bilan global
Scénario 1 : bois illimité	Favorable à l'effet de serre (évite émissions de l'incinération et des CSDU) Défavorable en consommation de ressource (pas de production de chaleur de l'incinérateur) Neutre (ou très faible impact) pour les autres catégories	Défavorable à l'effet de serre (pas de carbone biogénique capté par la production de pâte) Très favorable en terme de ressource pour des productions d'électricité non-renouvelables (évite une consommation d'électricité) Favorable pour la toxicité (pas de consommation électrique, pas de produit chimique)	Non concerné	Mix non ENR : Favorable Mix ENR : Défavorable Effet de serre : légèrement défavorable Ressource : favorable lorsque le mix électrique de production n'est pas 100% renouvelable
Scénario 2a : substitution énergie fossile	Favorable à l'effet de serre (évite émissions de l'incinération et des CSDU) Défavorable en consommation de ressource (pas de production de chaleur de l'incinérateur) Neutre (ou très faible impact) pour les autres catégories	Défavorable à l'effet de serre (pas de carbone biogénique capté par la production de pâte) Très favorable en terme de ressource pour des productions d'électricité non-renouvelables (évite une consommation d'électricité) Favorable pour la toxicité (pas de consommation électrique, pas de produit chimique)	Favorable à l'effet de serre Très favorable aux consommations de ressource (pas de source fossile utilisée) Défavorable pour la toxicité (émissions de particules et de NOx plus importantes que les chaudières classiques)	Mix non ENR : Très favorable Mix ENR : Légèrement favorable Légèrement défavorable pour la toxicité humaine Très favorable en consommation de ressource
Scénario 3 : substitution énergie renouvelable	Favorable à l'effet de serre (évite émissions de l'incinération et des CSDU) Défavorable en consommation de ressource (pas de production de chaleur de l'incinérateur) Neutre (ou très faible impact) pour les autres catégories	Défavorable à l'effet de serre (pas de carbone biogénique capté par la production de pâte) Très favorable en terme de ressource pour des productions d'électricité non-renouvelables (évite une consommation d'électricité) Favorable pour la toxicité (pas de consommation électrique, pas de produit chimique)	Neutre pour l'effet de serre Neutre pour les consommations de ressource Très défavorable pour la toxicité (émissions importantes de particules et de NOx)	Mix non ENR : Favorable Mix ENR : Défavorable Légèrement défavorable en effet de serre Défavorable pour la toxicité Consommation de ressource : favorable si mix électrique non-renouvelable

Tableau 45 : Principaux contributeurs au bilan global des scénarios

C. Coût externe

Le coût environnemental externe diffère du coût environnemental pour les catégories d'impact suivantes :

- Effet de serre, où le CO₂ fossile est internalisé (marché des quotas CO₂)
- Consommation de ressources naturelles, qui est partiellement internalisé (prix de l'énergie)

Le coût environnemental externe du recyclage d'une tonne de journaux, pour différentes combinaisons scénario/mix électrique, est présenté dans le tableau ci-dessous.

Mix électrique	Scénario 1	Scénario 2a	Scénario 2b
100 % nucléaire	- 51 €	- 125 €	- 14 €
100 % gaz	- 73 €	- 148 €	- 37 €
100 % charbon	- 151 €	- 225 €	- 114 €
100 % renouvelable	+ 63 €	- 12 €	+ 100 €

Tableau 46 : Coût externe du recyclage de journaux

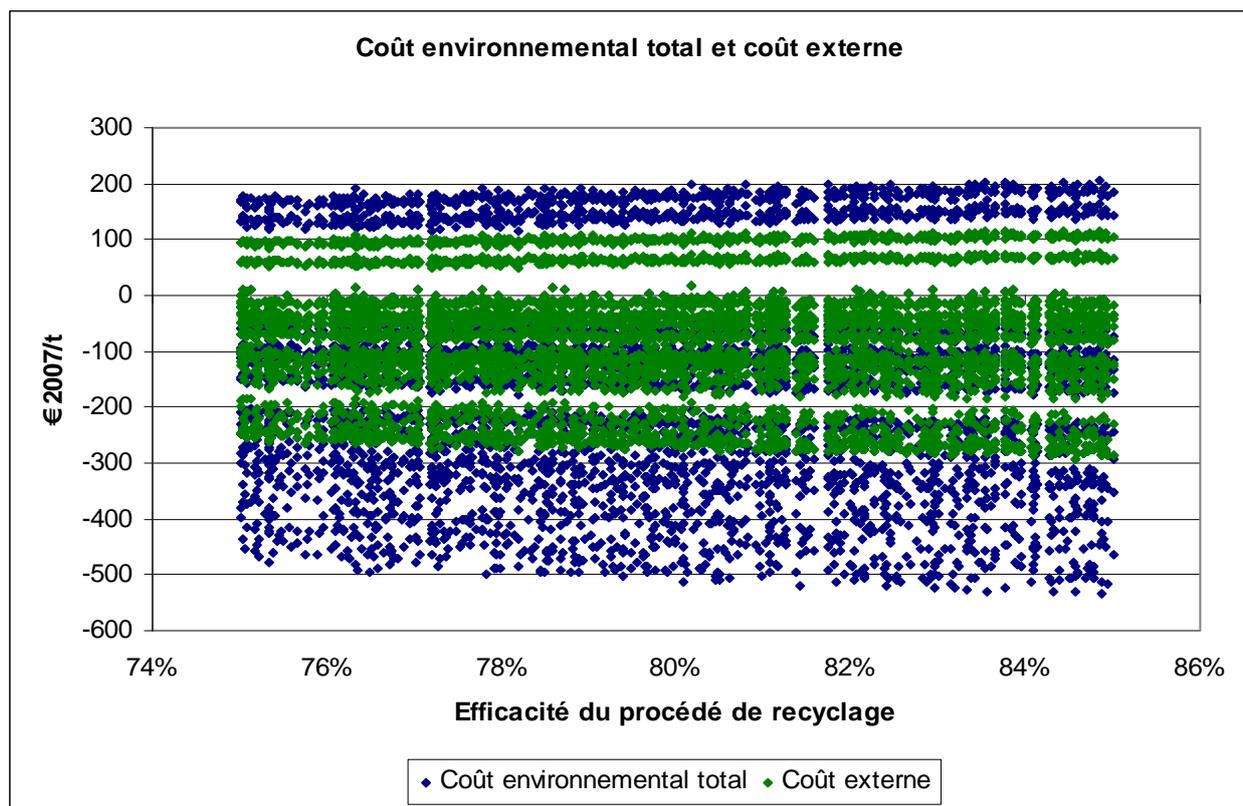


Figure 35 : Coût environnemental total et externe pour l'ensemble des couples scénario/mix électrique

En pratique, les coûts internalisés sont :

- Pour les émissions de gaz à effet de serre, seul le CO₂ fossile est internalisé. Celui-ci provient de la combustion d'énergie fossile ou de la production d'électricité (basée sur des sources fossiles).
- Les consommations de ressources naturelles, sont internalisées en moyenne à hauteur de 50 % du coût environnemental. Les coûts internalisés sont donc d'autant plus importants que le coût environnemental total lié à la consommation de ressources est élevé, ce qui est particulièrement le cas du scénario 2a.

Dans l'ensemble, la structure des coûts externes n'est pas modifiée en profondeur par rapport aux coûts environnementaux totaux. Les catégories d'impacts et les phases ayant une influence importante sur le coût environnemental total restent les plus influentes en ce qui concerne le coût environnemental externe.

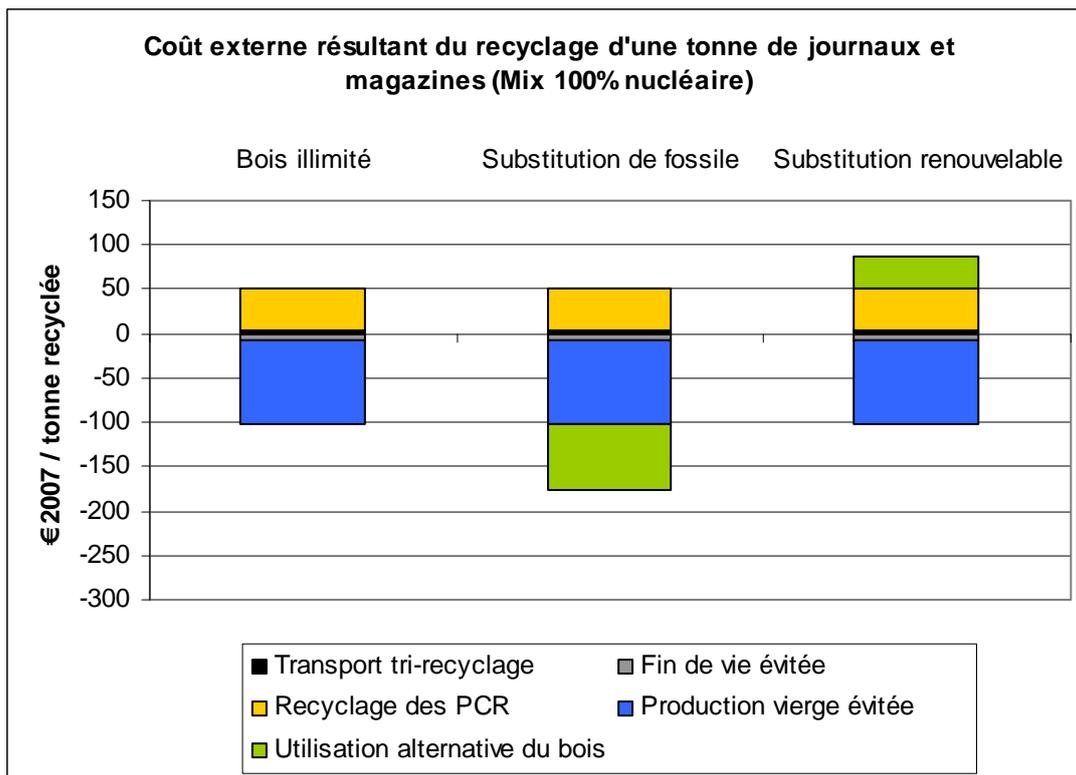


Figure 36 : Coût environnemental externe du recyclage d'une tonne de journaux, détaillé par phase (mix 100 % nucléaire)

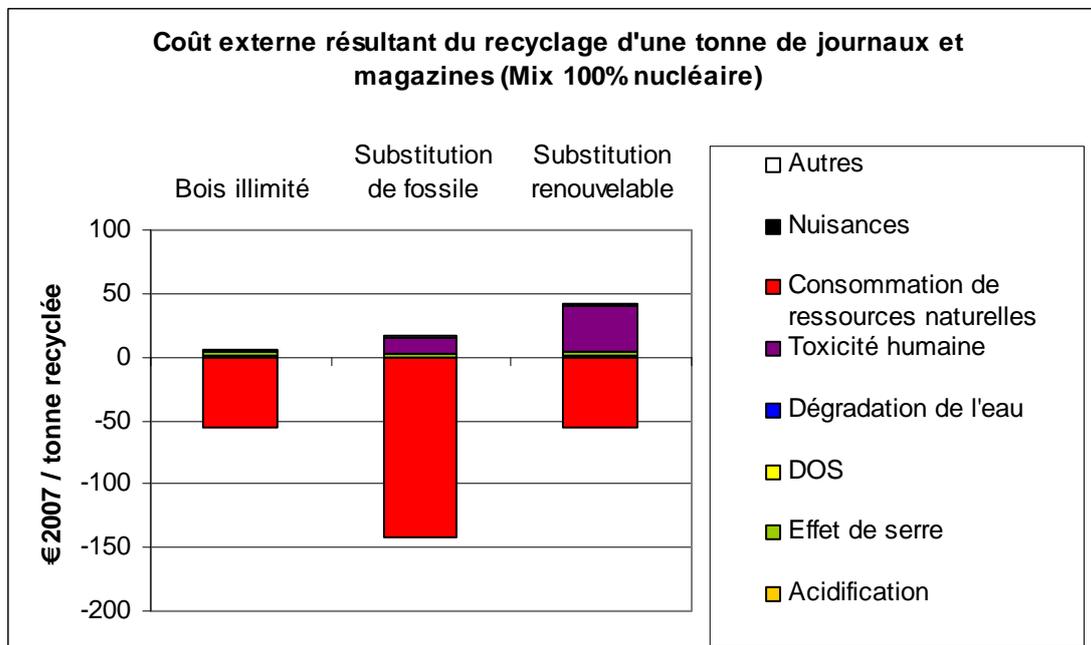


Figure 37 : Coût environnemental externe du recyclage d'une tonne de journaux, détaillé par catégorie d'impact

IV.3.3.3 Analyse de sensibilité des résultats

Outre les 3 scénarios d'utilisation du bois et les mix électriques, l'influence de différents paramètres sur le bilan du recyclage est également testée.

Le tableau ci-dessous indique l'influence d'une variation réaliste des paramètres du modèle sur les résultats :

Paramètre	Intervalle de valeurs du modèle	Influence
Rendement des chaudières bois	55 à 85 %	Forte
Consommation électrique du procédé de recyclage	250 à 350 kWh/t output	Moyenne
Consommation de dithionite de sodium du recyclage	4 à 10 kg /t output	Moyenne
Efficacité de recyclage (rendement)	75 à 85 %	Moyenne
Élimination des boues de recyclage	100 % incinération	Faible

Tableau 47 : Influence des paramètres

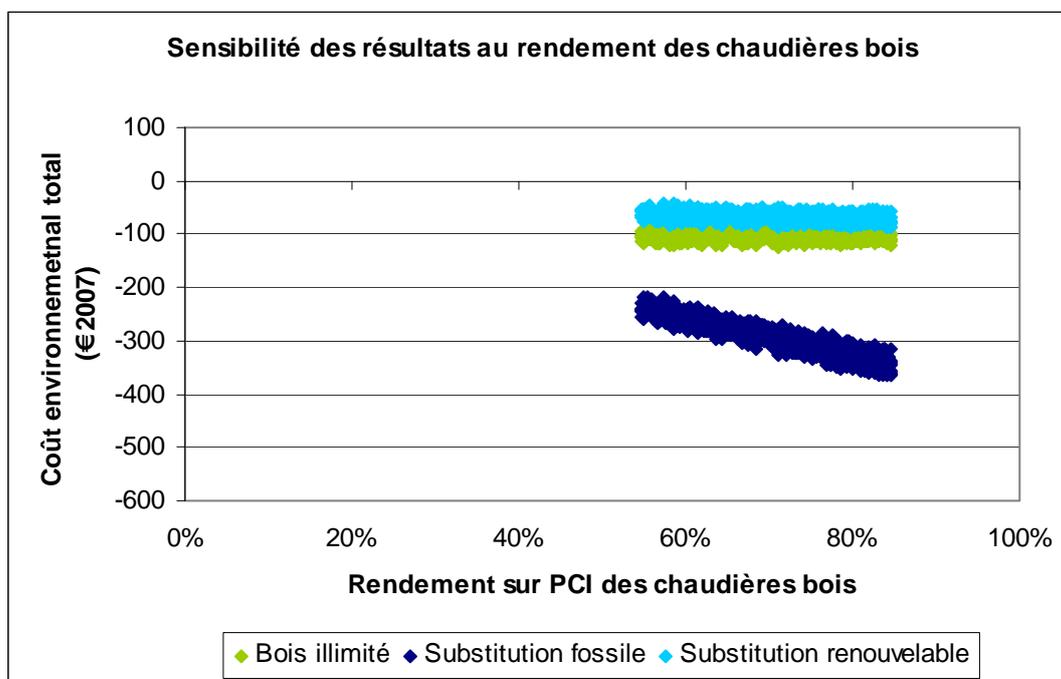


Figure 38 : Sensibilité des résultats au rendement des chaudières bois

Dans le modèle, les chaudières bois sont considérées comme ayant un rendement de 70 % sur PCI. Il s'agit de la valeur des procédés d'EcoInvent utilisés :

- heat, softwood logs, at furnace 100 kW
- heat, hardwood logs, at furnace 100 kW

Ce paramètre est particulièrement influent pour le scénario 2a où le bois non utilisé remplace une production de chaleur par des sources d'énergie fossile.

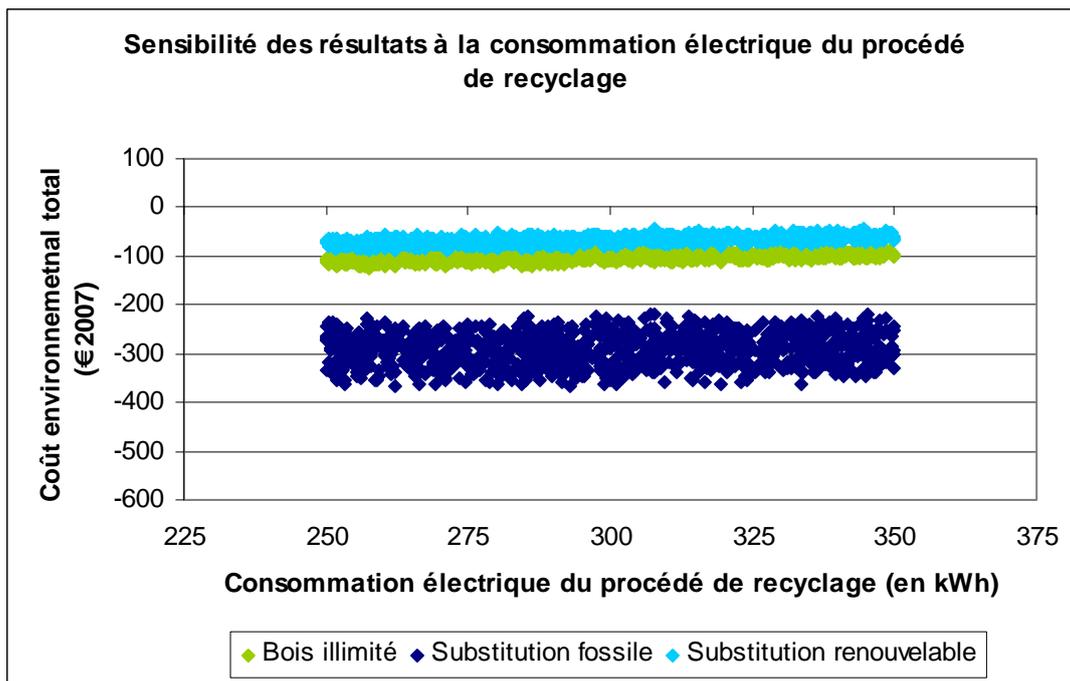


Figure 39 : Sensibilité des résultats à la consommation d'électricité du procédé de recyclage

Les consommations du procédé de recyclage influencent le résultat de façon modérée. Pour un champ de valeur allant de 250 à 350 kWh par tonne recyclée, l'écart de coût environnemental total est d'environ 30 €.

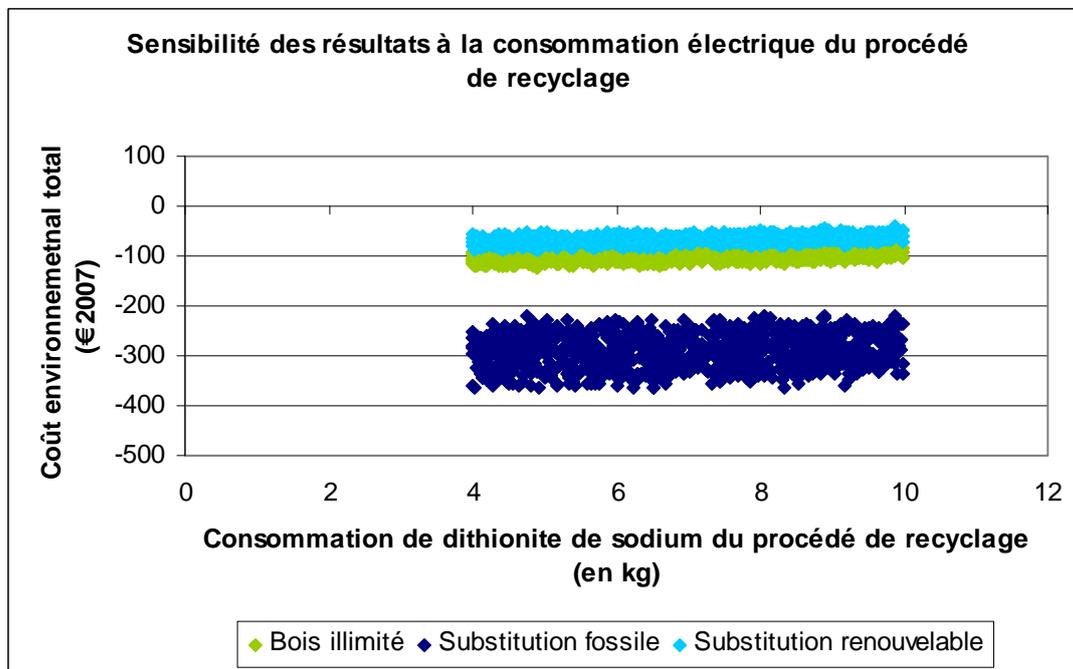


Figure 40 : Sensibilité des résultats à la consommation de dithionite de sodium (procédé de recyclage)

Le procédé de recyclage implique une consommation de dithionite de sodium. La variation de consommation de ce composé engendre des écarts de l'ordre de 15 €.

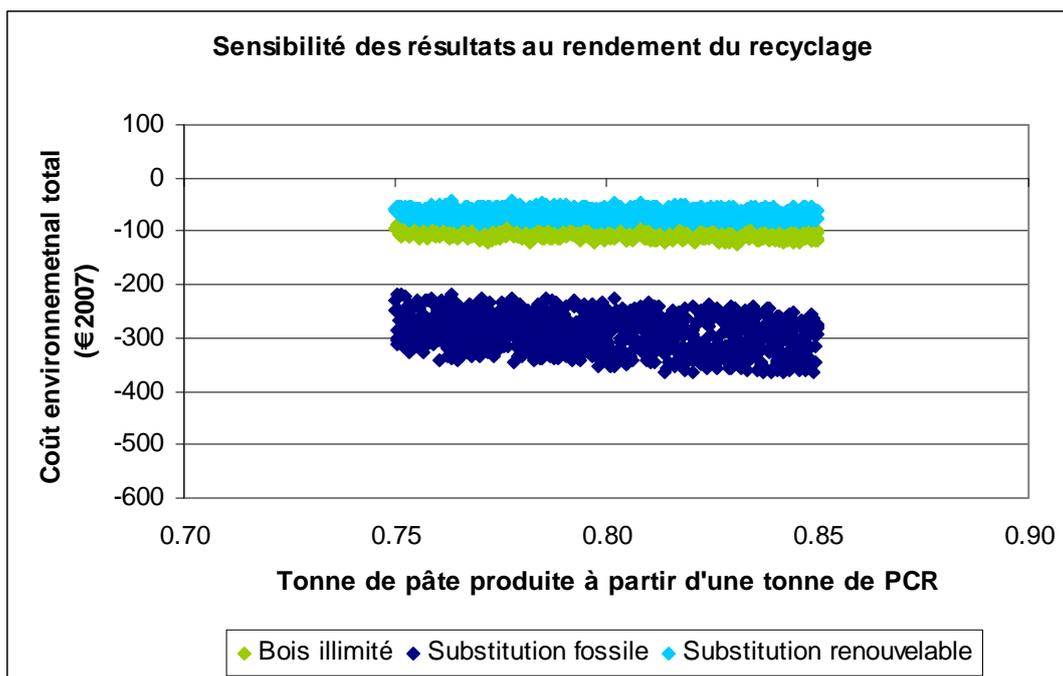


Figure 41 : Sensibilité des résultats au rendement du recyclage

La variation du rendement du procédé de recyclage influence particulièrement le scénario 2a, où le bois se substitue à une ressource fossile.

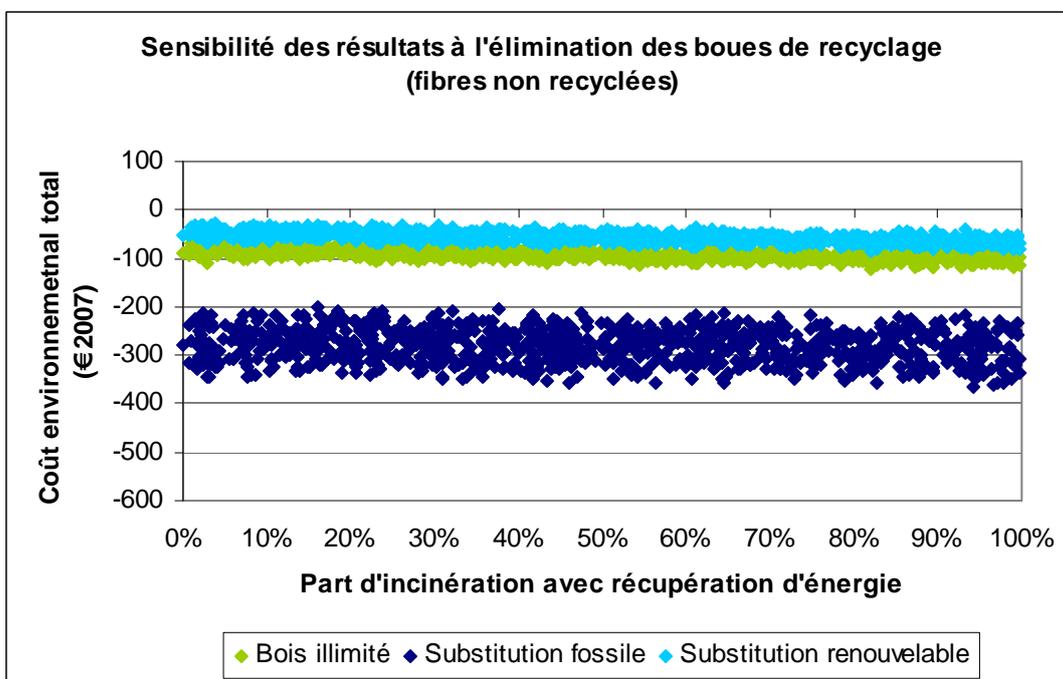


Figure 42 : Sensibilité des résultats à la fin de vie des boues de recyclage

Le type d'élimination des boues de recyclage influe très peu sur le coût environnemental total. Les impacts sont légèrement plus favorables lorsque les boues sont incinérées avec récupération de chaleur.

IV.3.3.4 Variantes liées à la monétarisation de l'effet de serre

Ces variantes portent sur deux paramètres :

- Cas de base :
 - Le coût environnemental lié aux émissions de CO₂ est internalisé à 100 % pour le CO₂ et à 0 % pour les autres GES.
 - La tonne de CO₂ vaut 20 €
- Variation sur le degré d'internalisation (ne concerne que le coût externe) :
 - 0 % du coût environnemental des émissions de GES sont internalisés
 - 100 % du coût environnemental des émissions de GES sont internalisés
- Variation sur le facteur de monétarisation des émissions de GES³⁰ :
 - La tonne de CO₂ vaut 50 €
 - La tonne de CO₂ vaut 96 €

Le tableau ci-dessous se base sur les données pour un mix électrique 100 % nucléaire.

Scénario	Coût de la tonne de CO ₂ équivalent		Coût environnemental total	Coût externe		
				0% d'internalisation pour tous les GES	100% d'internalisation CO ₂ , 0% pour autres GES	100% d'internalisation pour tous les GES
Scénario 1 : ressources en bois illimitées	Objectif Kyoto	20 €/t CO ₂ eq.	- 102 €	- 42 €	- 51 €	- 54 €
	Objectif durabilité, valeur basse	50 €/t CO ₂ eq.	- 84 €	- 24 €	- 45 €	- 54 €
	Objectif durabilité, valeur haute	96 €/t CO ₂ eq.	56 €	3 €	- 36 €	- 54 €
Scénario 2a : Substitution d'énergie fossile	Objectif Kyoto	20 €/t CO ₂ eq.	- 291 €	- 134 €	- 125 €	- 128 €
	Objectif durabilité, valeur basse	50 €/t CO ₂ eq.	- 301 €	- 144 €	- 121 €	- 128 €
	Objectif durabilité, valeur haute	96 €/t CO ₂ eq.	- 316 €	- 159 €	- 114 €	- 128 €
Scénario 2b : Substitution d'énergie renouvelable	Objectif Kyoto	20 €/t CO ₂ eq.	- 66 €	- 6 €	- 14 €	- 18 €
	Objectif durabilité, valeur basse	50 €/t CO ₂ eq.	- 48 €	12 €	- 8 €	- 18 €
	Objectif durabilité, valeur haute	96 €/t CO ₂ eq.	- 21 €	39 €	1 €	- 18 €

Tableau 48 : Résultats selon la monétarisation de l'effet de serre

Le tableau ci-dessus montre que la valeur du facteur de monétarisation des gaz à effet de serre peut influencer fortement le coût environnemental total et le coût environnemental externe en cas d'internalisation nulle ou limitée au CO₂.

Pour les scénarios 1 et 2b, l'internalisation des coûts liés aux GES engendre une diminution du coût (ou une augmentation du bénéfice, suivant les cas) liés au recyclage.

À l'inverse, dans le scénario 2a, l'internalisation des émissions de gaz à effet de serre est guidée par des mécanismes plus complexes. En effet, le recyclage des journaux :

- Évite des émissions de CO₂ fossile
- Engendre des émissions d'autres GES

³⁰ Ces valeurs sont discutées plus en détails au point II.2.4.

Ainsi, le coût externe est le plus élevé (ou plutôt le moins bénéficiaire) lorsque les seules émissions de CO₂ fossile sont internalisées : une partie du gain environnemental est internalisé et le coût externe augmente. Lorsque les coûts associés aux autres GES sont également internalisés, une partie de l'impact environnemental est internalisé et le coût externe diminue.

IV.3.3.5 Variantes liées à la monétarisation des consommations de ressources énergétiques

Cette variante porte sur deux paramètres :

- La valeur du facteur de monétarisation, qui varie de 20 % par rapport à la valeur du Guide de monétarisation
- Le taux d'internalisation des coûts environnementaux liés à la consommation d'énergie, sur base de trois valeurs du baril de pétrole :
 - Le baril est à 64 \$, ce qui est la valeur retenue dans le Guide de monétarisation
 - Le baril est à 100 \$, ce qui correspond à la valeur courant septembre 2008
 - Le baril est à 150 \$, ce qui correspond à une hypothèse de prix élevés à long terme (record de 147 \$ en juillet 2008)

Les résultats de ces variations sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Scénario	Valeur du facteur de monétarisation	Coût environnemental total	Coût externe		
			Baril à 64 \$	Baril à 100 \$	Baril à 150 \$
Scénario 1 : ressources en bois illimitées	0,012 €/MJ	- 79 €	- 28 €	4 €	4 €
	0,015 €/MJ	- 102 €	- 51 €	- 16 €	4 €
	0,018 €/MJ	- 125 €	- 74 €	- 40 €	4 €
Scénario 2a : Substitution d'énergie fossile	0,012 €/MJ	- 232 €	- 69 €	15 €	15 €
	0,015 €/MJ	- 291 €	- 125 €	- 36 €	15 €
	0,018 €/MJ	- 350 €	- 189 €	- 100 €	15 €
Scénario 2b : Substitution d'énergie renouvelable	0,012 €/MJ	- 43 €	8 €	41 €	41 €
	0,015 €/MJ	- 66 €	- 14 €	22 €	41 €
	0,018 €/MJ	- 89 €	- 40 €	- 4 €	41 €

Tableau 49 : Résultats selon la monétarisation des consommations d'énergie

Remarque :

Dans certaines configurations, le coût interne de la consommation d'énergie dépasse le coût environnemental total. Les chiffres présentés reposent sur le principe qu'un coût internalisé ne peut dépasser (en valeur absolue) le coût environnemental total. Le taux d'internalisation est plafonné à 100 % (voir section II.2.5.2).

IV.3.4. Recyclage de carton ondulé issu des commerces (*corrugated and kraft*)

Unité fonctionnelle = Recyclage d'une tonne de carton ondulé (carton bruns utilisés par les entreprises et les commerces) issu des commerces pour fabriquer du carton ondulé

IV.3.4.1 Résultats globaux

Les résultats reprenant les différents scénarios et les différents mix sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Mix électrique	Scénario 1	Scénario 2a	Scénario 2b
100 % nucléaire	- 1 €	- 408 €	76 €
100 % gaz	- 5 €	- 413 €	71 €
100 % charbon	- 13 €	- 421 €	68 €
100 % renouvelable	18 €	- 390 €	94 €

Tableau 50 : Coût environnemental total du recyclage d'une tonne de cartons ondulés en carton ondulés

Les résultats sont fortement influencés par les scénarios choisis, à l'inverse, le choix des mix électriques n'a qu'une incidence mineure, hormis (mais dans une moindre mesure) la variante 100 % renouvelable. La figure ci-dessous met en évidence ces ordres de grandeur.

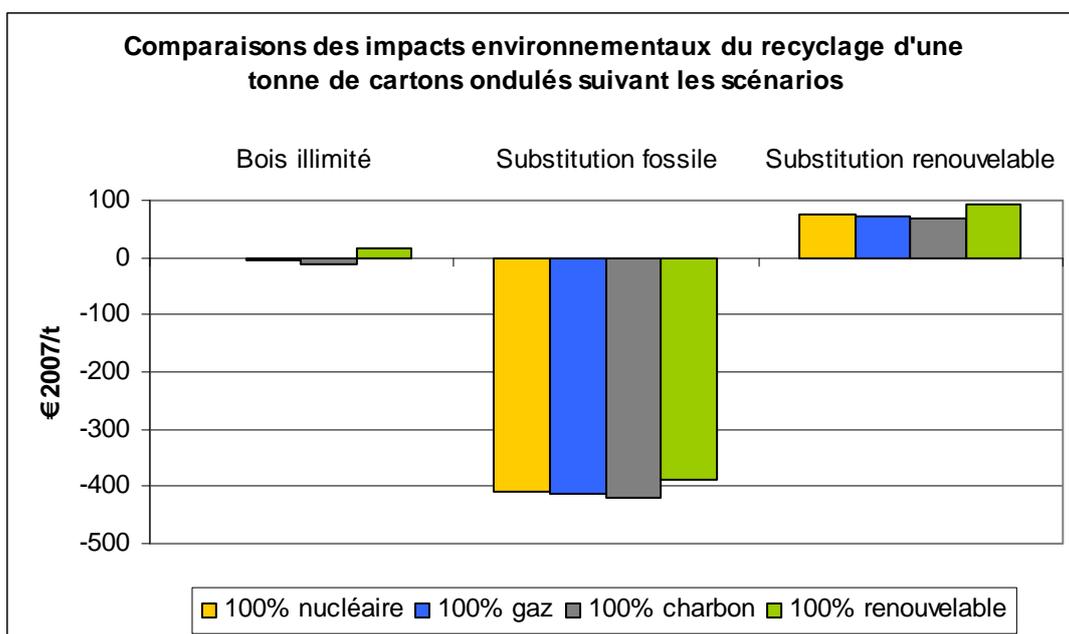


Figure 43 : Impacts monétarisés du recyclage d'une tonne de cartons ondulés

Sur cette figure, les impacts de chaque combinaison scénario/mix électrique sont exprimés par rapport au scénario 2 avec un mix 100 % nucléaire. On peut établir une tendance pour chaque scénario :

- Dans le cas du scénario 1, le recyclage est neutre
- Le scénario 2a présente un important bénéfice environnemental, les variations liées au choix du mix électrique varient de moins de 10 %
- Le scénario 2b, correspond à une situation où le recyclage des papiers/cartons représente un coût environnemental modéré

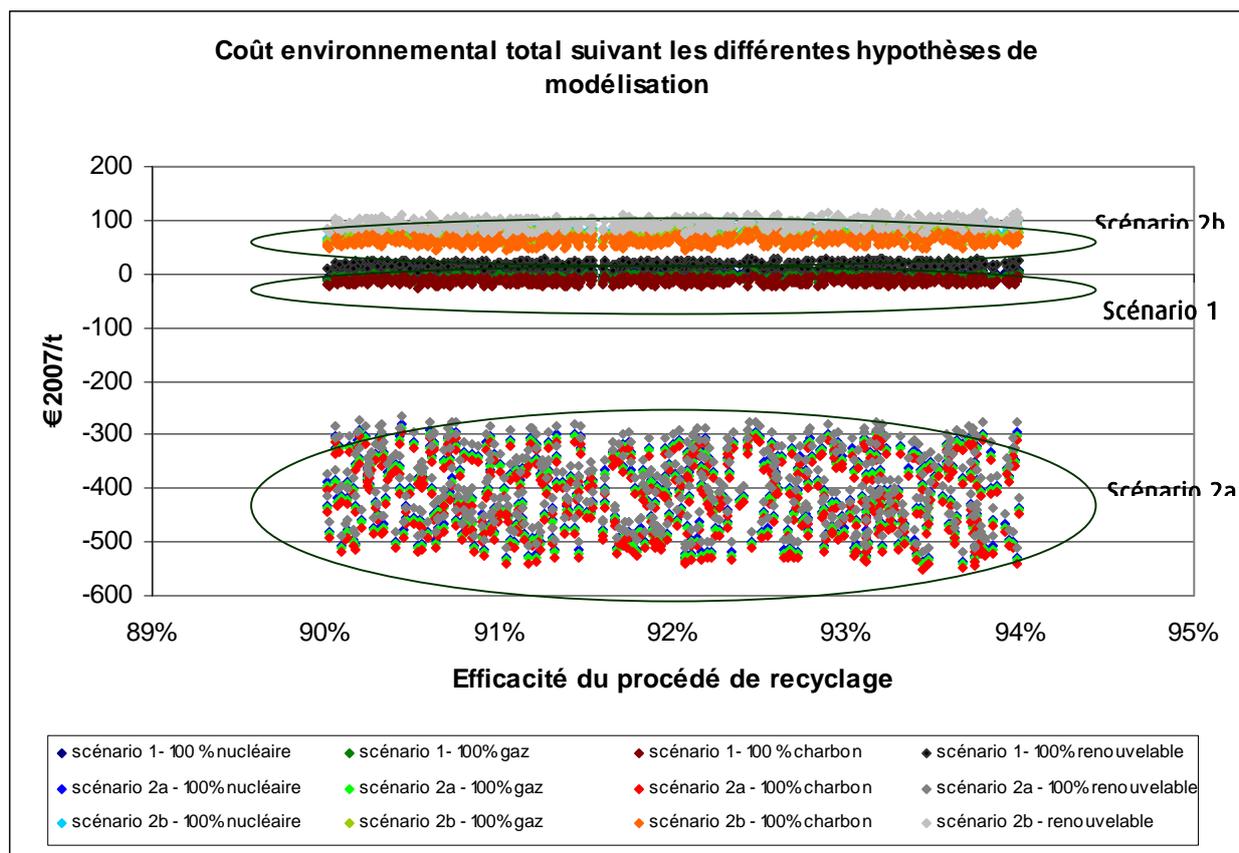


Figure 44 : Coût environnemental total pour l'ensemble des cas étudiés

La figure ci-dessus illustre l'ensemble des couples scénario/mix électrique. Il est possible de distinguer trois nuages de points, correspondant chacun à un scénario :

- Le nuage de points situé entre un coût de - 550 et - 300 € correspond au scénario 2a, où le bois se substitue à de l'énergie fossile ; l'économie d'utilisation de la ressource fossile et les émissions de CO₂ correspondantes sont les avantages principaux.
- Le nuage de points autour de l'axe des abscisses correspond au scénario 1, où le bois n'est pas valorisé. Le recyclage ne permet pas d'économiser une ressource et en freine même l'exploitation.
- Le nuage de points représentant un coût légèrement inférieur à 100 € correspond au scénario 2b, où le bois remplace une production d'énergie renouvelable

À l'inverse, le mix électrique n'est pas un facteur assez important pour faire apparaître plusieurs situations. Compte tenu des tendances similaires quel que soit le mix électrique, seul le cas 100 % nucléaire est décomposé par phases et par catégories d'impact. Les résultats et les tendances sont alors extrapolables aux autres mix, sachant que ces scénarios jouent sur les émissions de CO₂ fossile.

IV.3.4.2 Résultats dans le cas d'un mix 100 % nucléaire

A. Coût environnemental total

A.1 Résultats par étapes

La différence entre les scénarios est liée à l'utilisation alternative du bois. En effet il s'agit du seul paramètre variant d'un scénario à l'autre. La figure ci-dessous met en évidence les points suivants :

- Le recyclage des cartons d'emballages représente un léger coût environnemental lorsque l'on ne considère pas d'utilisation alternative du bois car la ressource en bois est illimitée (scénario 1). La production évitée de pâte vierge engendre un bénéfice environnemental moins important que les impacts de la fin de vie évitée et le recyclage cumulés
- La fin de vie "non recyclage" des cartons présentant un bénéfice environnemental grâce à la récupération d'énergie lors de l'incinération, cette fin de vie évitée grâce au recyclage engendre un impact défavorable pour l'environnement
- L'utilisation alternative du bois engendre des coûts/bénéfices environnementaux d'une amplitude plus importante que n'importe quelle phase
- Les transports sont négligeables, quel que soit le scénario considéré

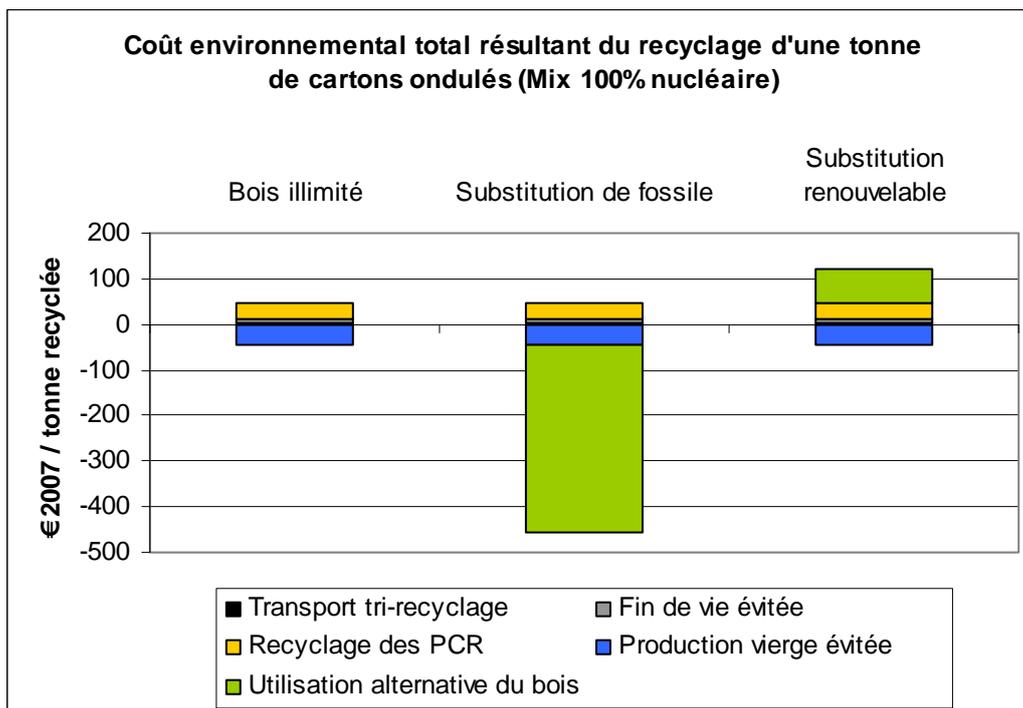


Figure 45 : Coût environnemental total du recyclage d'une tonne de cartons ondulés, détaillé par phase

Dans le scénario 2a, le bénéfice environnemental de l'utilisation alternative du bois est la somme des impacts du bois brûlé en chaudière et de la production évitée de chaleur à partir de sources fossiles. Dans ce cadre, le bilan est largement favorable.

À l'inverse, le scénario 2b, dont l'utilisation alternative du bois est la somme des impacts du bois brûlé en chaudière et d'une production de chaleur via une source renouvelable, est défavorable. En effet, les impacts du bois brûlé en chaudière sont plus importants que les impacts évités d'une production de chaleur à partir de panneaux solaires thermiques.

Pour plus de détails sur ces impacts, le lecteur se référera au chapitre IV.3.2.

A.2 Résultats par catégorie d'impact

Quel que soit le scénario, les catégories d'impact ayant une amplitude suffisante pour influencer sur le résultat final sont :

- La consommation de ressources naturelles, en particulier lorsque l'utilisation alternative du bois remplace de l'énergie fossile (scénario 2a)
- La toxicité humaine
- Les émissions de gaz à effet de serre

Pour les scénarios 2, la consommation de ressources fossiles est largement dominante, tandis que pour le scénario 1, elle est à égalité avec la toxicité.

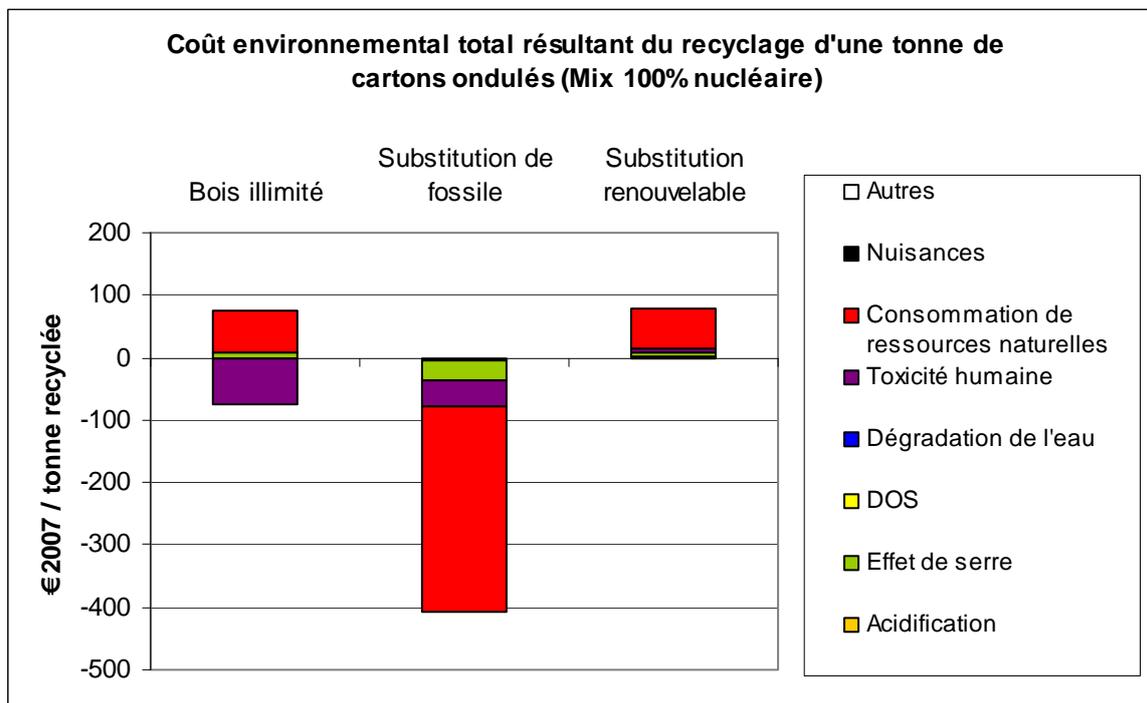


Figure 46 : Coût environnemental total du recyclage d'une tonne de cartons ondulés, détaillé par catégorie d'impact

Les tableaux ci-dessous présentent la décomposition des impacts par phase et par catégorie d'impact.

Phases	Acidification	Effet de serre	DOS	Dégradation de l'eau	Toxicité humaine	Consommation de ressources naturelles	Nuisances	Autres	Coût environnemental total
Transport tri-recyclage	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	2	2	> -1 et < 1	4
Fin de vie évitée	> -1 et < 1	-26	> -1 et < 1	-1	-3	38	> -1 et < 1	> -1 et < 1	9
Recyclage des PCR	> -1 et < 1	3	> -1 et < 1	> -1 et < 1	4	27	> -1 et < 1	> -1 et < 1	33
Production vierge évitée	-1	31	> -1 et < 1	> -1 et < 1	-72	> -1 et < 1	-3	-1	-47
Utilisation alternative du bois	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1
Total	-1	8	> -1 et < 1	-1	-72	66	> -1 et < 1	-1	-1

Tableau 51 : Décomposition des impacts du recyclage d'une tonne de cartons ondulés, par phase et par catégorie d'impact, cas du scénario 1 (ressource bois illimitée)

Phases	Acidification	Effet de serre	DOS	Dégradation de l'eau	Toxicité humaine	Consommation de ressources naturelles	Nuisances	Autres	Coût environnemental total
Transport tri-recyclage	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	2	2	> -1 et < 1	4
Fin de vie évitée	> -1 et < 1	-26	> -1 et < 1	-1	-3	38	> -1 et < 1	> -1 et < 1	9
Recyclage des PCR	> -1 et < 1	3	> -1 et < 1	> -1 et < 1	4	27	> -1 et < 1	> -1 et < 1	33
Production vierge évitée	-1	31	> -1 et < 1	> -1 et < 1	-72	> -1 et < 1	-3	-1	-47
Utilisation alternative du bois	-3	-40	> -1 et < 1	> -1 et < 1	30	-394	> -1 et < 1	1	-408
Total	-4	-32	> -1 et < 1	-1	-42	-328	> -1 et < 1	> -1 et < 1	-408

Tableau 52 : Décomposition des impacts du recyclage d'une tonne de cartons ondulés, par phase et par catégorie d'impact, cas du scénario 2a (Substitution de fossile)

Phases	Acidification	Effet de serre	DOS	Dégradation de l'eau	Toxicité humaine	Consommation de ressources naturelles	Nuisances	Autres	Coût environnemental total
Transport tri-recyclage	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	2	2	> -1 et < 1	4
Fin de vie évitée	> -1 et < 1	-26	> -1 et < 1	-1	-3	38	> -1 et < 1	> -1 et < 1	9
Recyclage des PCR	> -1 et < 1	3	> -1 et < 1	> -1 et < 1	4	27	> -1 et < 1	> -1 et < 1	33
Production vierge évitée	-1	31	> -1 et < 1	> -1 et < 1	-72	> -1 et < 1	-3	-1	-47
Utilisation alternative du bois	2	-1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	80	-5	> -1 et < 1	1	76
Total	> -1 et < 1	7	> -1 et < 1	-1	8	61	> -1 et < 1	> -1 et < 1	76

Tableau 53 : Décomposition des impacts du recyclage d'une tonne de cartons ondulés, par phase et par catégorie d'impact, cas du scénario 2b (Substitution de renouvelable)

Concernant la catégorie gaz à effet de serre :

- Le fait d'éviter une incinération ou une mise en CSDU engendre un gain environnemental. En effet, le recyclage évite des émissions de CO₂ biogénique (incinération et CSDU) et de méthane biogénique (en faible quantité pour la part envoyée en CSDU). Pour rappel, la dégradation du papier en CSDU est considérée comme étant de 27 % à un horizon temporel de 100 ans.
- La production de pâte vierge permet des gains en termes d'émissions de gaz à effet de serre :
 - La production de pâte engendre des surplus d'énergie injectés sur les réseaux. Ceux-ci se substituent aux moyens de production classiques et représentent donc un bénéfice environnemental. La production évitée engendre donc un coût environnemental.
 - Note : Tout le carbone biogénique n'est pas relâché lors du procédé de production et la pâte à papier comporte encore une part importante du carbone capté lors de la croissance du bois (ce carbone est relâché lors de l'incinération et – partiellement – lors de la mise en CSDU, voir point précédent)
- Les impacts de l'utilisation alternative du bois dépendent de ce à quoi il se substitue. Le bois brûlé en chaudière a un cycle quasiment neutre (à l'exception des émissions liées au débardage et aux transports du bois), le carbone émis lors de la combustion correspondant au carbone capté lors de la croissance des arbres.

Ainsi, seule la source de chaleur évitée a un impact. Dans le cas d'une substitution de fossile, le bénéfice environnemental est conséquent ; à l'inverse, il est quasiment nul lorsque le bois brûlé remplace une source de chaleur renouvelable (panneaux solaires thermiques).

Concernant la catégorie toxicité :

- La production évitée de pâte vierge permet un bénéfice environnemental important. Les autres étapes hors utilisation alternative n'ont que des impacts d'une ampleur réduite.
- Les impacts de l'utilisation alternative du bois sont globalement défavorables. La production de chaleur à partir de bois a un coût environnemental plus élevé que les productions alternatives, qu'il s'agisse de sources renouvelables (écart très important) ou de sources fossiles (écart modéré). Cette tendance est liée aux importantes émissions de particules et d'oxydes d'azote de la production de chaleur à partir de bois.

Concernant la catégorie consommations de ressources naturelles :

- La fin de vie évitée représente un coût environnemental. La production de chaleur et d'électricité liée à la fin de vie (incinération) doit être compensée par des productions alternatives, qui consomment des ressources naturelles.
- Le procédé de recyclage des cartons d'emballages engendre des consommations de ressources naturelles, en particulier de ressources fossiles, pour la production de chaleur.
- La production vierge évitée a globalement un impact neutre, les surplus d'énergie provenant du bois lors de la production de papier (injectés sur les réseaux) compensant les consommations énergétiques de cette production.
- L'utilisation alternative du bois engendre un bénéfice environnemental. La source de chaleur substituée joue un rôle déterminant dans le bénéfice. Dans le cas d'une substitution de renouvelable, celui-ci est quasiment nul, alors qu'il est très important lorsque le bois se substitue à une source d'énergie fossile.

Concernant la catégorie nuisances :

- De manière générale, les nuisances n'ont qu'un impact très limité, cependant il convient de rappeler que seules les nuisances liées aux transports sont prises en compte (voir chapitre II.2.6). Ainsi, les nuisances liées aux usines ne sont pas prises en compte, notamment celles liées aux odeurs.

Les principales origines d'impacts favorables ou défavorables pour chaque scénario sont données dans le tableau ci-dessous.

	Éviter la fin de vie	Éviter la production vierge	Utilisation alternative du bois	Bilan global
Scénario 1 : bois illimité	Favorable à l'effet de serre (évite émissions de l'incinération et des CSDU) Défavorable en consommation de ressource (pas de production de chaleur de l'incinérateur) Neutre (ou très faible impact) pour les autres catégories	Défavorable à l'effet de serre : pas de carbone biogénique capté par la production de pâte Neutre en terme de consommation de ressources : les surplus d'énergie compensent les consommations Favorable pour la toxicité (pas de consommation de produit chimique)	Non concerné	Légèrement défavorable Effet de serre : neutre Toxicité : favorable Consommation de ressources : défavorable
Scénario 2a : substitution énergie fossile	Favorable à l'effet de serre (évite émissions de l'incinération et des CSDU) Défavorable en consommation de ressource (pas de production de chaleur de l'incinérateur) Neutre (ou très faible impact) pour les autres catégories	Défavorable à l'effet de serre : pas de carbone biogénique capté par la production de pâte Neutre pour la consommation de ressource : les surplus d'énergie compensent les consommations Favorable pour la toxicité (pas de consommation de produit chimique)	Très légèrement favorable à l'effet de serre Très favorable aux consommations de ressource (pas de source fossile utilisée) Défavorable pour la toxicité (émissions de particules et de NO _x plus importantes que les chaudières classiques)	Très favorable Effet de serre : légèrement favorable Toxicité : neutre Consommation de ressource : très favorable
Scénario 3 : substitution énergie renouvelable	Favorable à l'effet de serre (évite émissions de l'incinération et des CSDU) Défavorable en consommation de ressource (pas de production de chaleur de l'incinérateur) Neutre (ou très faible impact) pour les autres catégories	Défavorable à l'effet de serre : pas de carbone biogénique capté par la production de pâte Neutre pour la consommation de ressource : les surplus d'énergie compensent les consommations Favorable pour la toxicité (pas de consommation de produit chimique)	Neutre pour l'effet de serre Neutre pour les consommations de ressource Très défavorable pour la toxicité (émissions importantes de particules et de NO _x)	Défavorable Effet de serre : légèrement défavorable Défavorable pour la toxicité Consommation de ressource : défavorable

Tableau 54 : Principaux contributeurs au bilan global des scénarios

B. Coût externe

Le coût externe diffère du coût environnemental total pour les catégories d'impact suivantes :

- Effet de serre, où le CO₂ fossile est internalisé (marché des quotas de CO₂)
- Consommation de ressources naturelles, qui est partiellement internalisé (prix de l'énergie)

Le coût environnemental externe du recyclage d'une tonne de carton d'emballage, pour différentes combinaisons scénario/mix électrique, est présenté dans le tableau ci-dessous.

Mix électrique	Scénario 1	Scénario 2a	Scénario 2b
100 % nucléaire	- 41 €	- 202 €	38 €
100 % gaz	- 43 €	- 204 €	36€
100 % charbon	- 49 €	- 210 €	30 €
100 % renouvelable	- 32 €	- 194 €	47 €

Tableau 55 : Coût environnemental externe du recyclage de cartons ondulés en carton ondulés

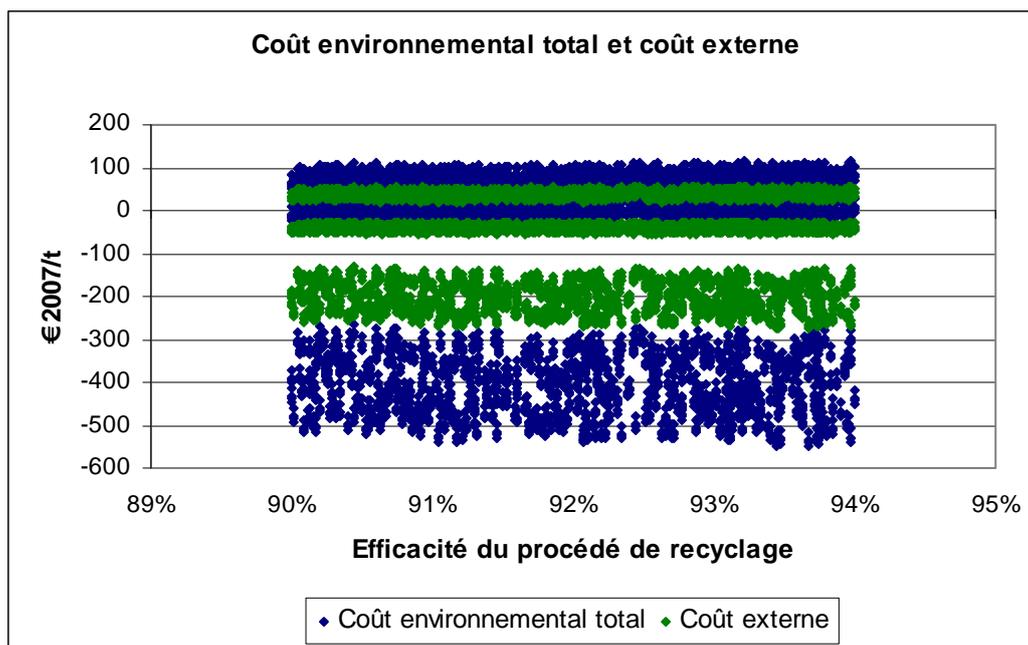


Figure 47 : Coût environnemental total et externe pour l'ensemble des couples scénario/mix électrique

En pratique, les coûts internalisés sont :

- Pour les émissions de gaz à effet de serre, seul le CO₂ fossile est internalisé. Celui-ci provient de la combustion d'énergie fossile.
 - Ce point est important uniquement dans le scénario 2a. Le bénéfice environnemental est en partie internalisé ; en conséquence, le coût externe du recyclage augmente.
 - Dans les autres scénarios, les émissions de CO₂ biogénique (donc non-internalisées) sont largement supérieures aux émissions de CO₂ fossile.
- Les consommations de ressources naturelles sont internalisées en moyenne à hauteur de 50 % du coût environnemental. Les coûts internalisés sont donc d'autant plus importants que le coût environnemental total lié à la consommation de ressources est élevé, ce qui est particulièrement le cas du scénario 2a.

La contribution relative de la catégorie d'impact toxicité augmente étant donné qu'aucun impact n'est internalisé.

Dans l'ensemble, la structure des coûts externes n'est pas modifiée en profondeur par rapport aux coûts environnementaux totaux. Les catégories d'impacts et les phases ayant une influence importante sur le coût environnemental total restent les plus influentes en ce qui concerne le coût environnemental externe. Notons que pour le scénario 1, la catégorie toxicité devient la plus impactante.

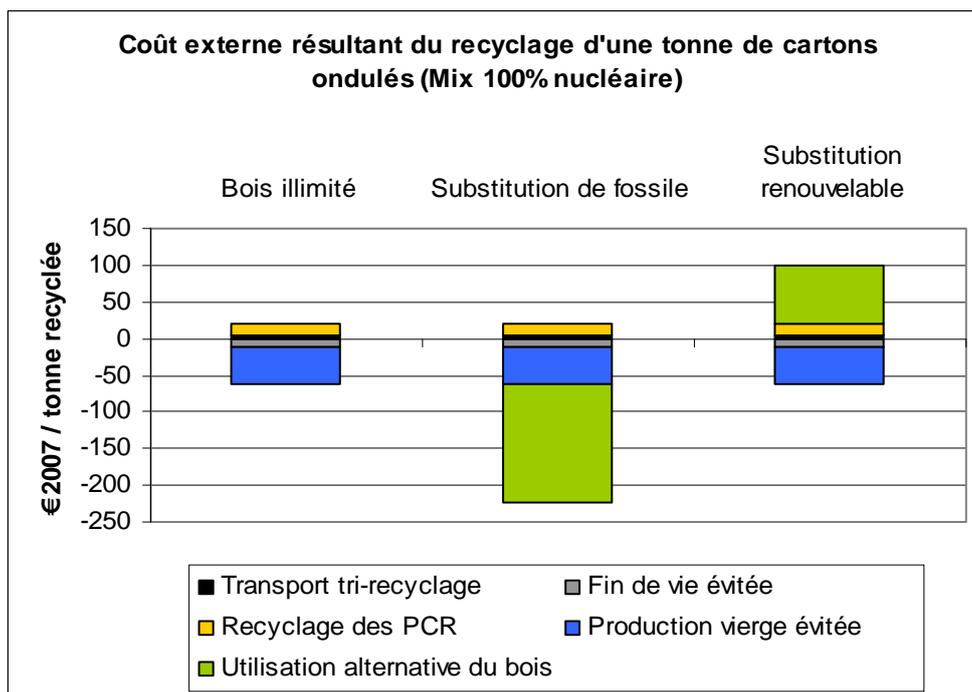


Figure 48 : Coût environnemental externe du recyclage d'une tonne de cartons ondulés, détaillé par phase

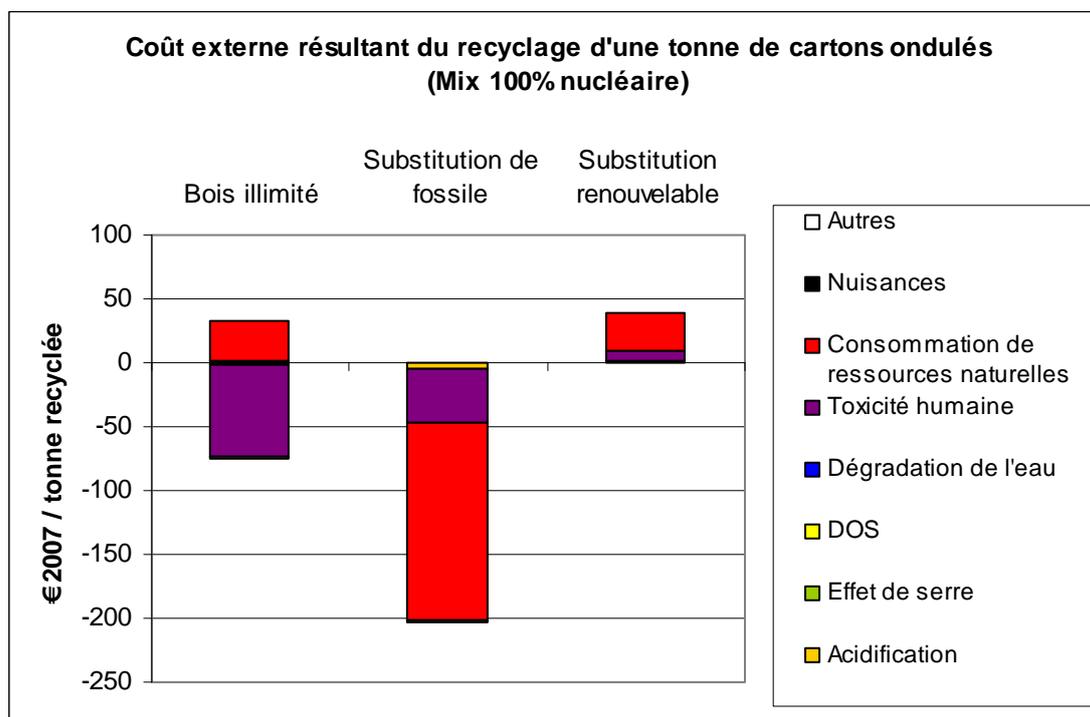


Figure 49 : Coût environnemental externe du recyclage d'une tonne de cartons ondulés, détaillé par catégorie d'impact

IV.3.4.3 Analyse de sensibilité des résultats

Hormis les 3 scénarios et les mix électriques, l'influence de différents paramètres sur le bilan du recyclage est également testée.

Le tableau ci-dessous indique l'influence d'une variation réaliste des paramètres du modèle sur les résultats :

Paramètre	Intervalle de valeurs du modèle	Influence
Rendement des chaudières au bois	55 à 85 %	Forte
Consommation électrique du procédé de recyclage	150 à 250 kWh/t output	Moyenne
Efficacité de recyclage (rendement)	90 à 94 %	Faible (intervalle restreint)
Élimination des boues de recyclage	100% incinération	Très faible

Tableau 56 : Influence des paramètres

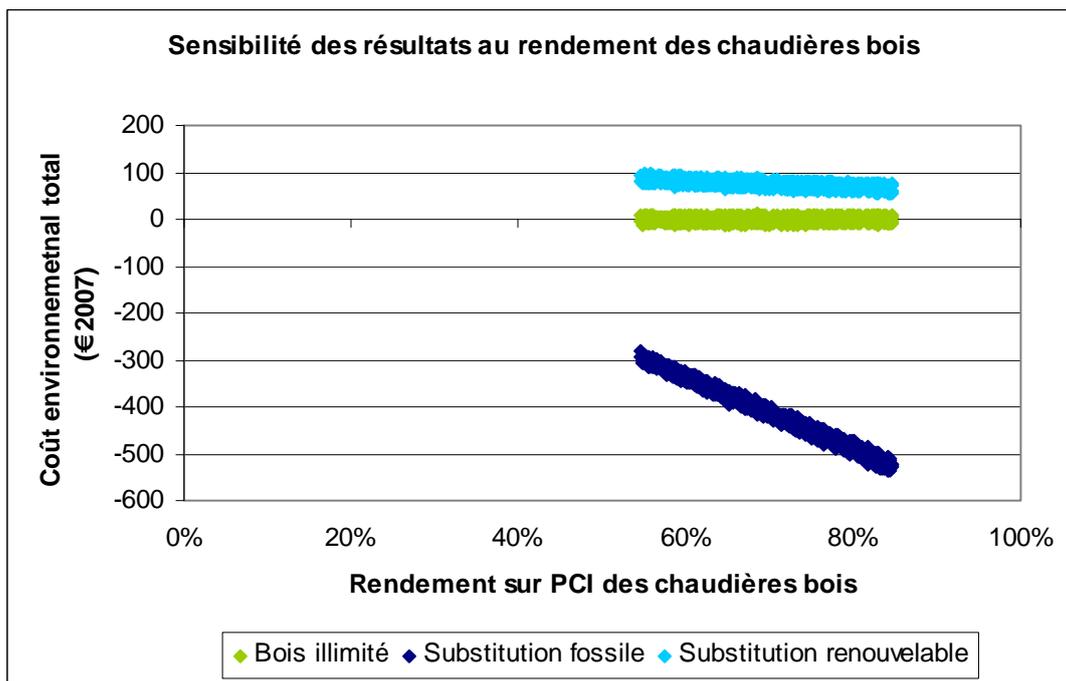


Figure 50 : Sensibilité des résultats au rendement des chaudières bois

Dans le modèle, les chaudières bois sont considérées comme ayant un rendement de 70 % sur PCI. Il s'agit de la valeur des procédés d'EcoInvent utilisés :

- heat, softwood logs, at furnace 100 kW
- heat, hardwood logs, at furnace 100 kW

Ce paramètre est particulièrement influent pour le scénario 2a où le bois non utilisé remplace une production de chaleur par des sources d'énergie fossile.

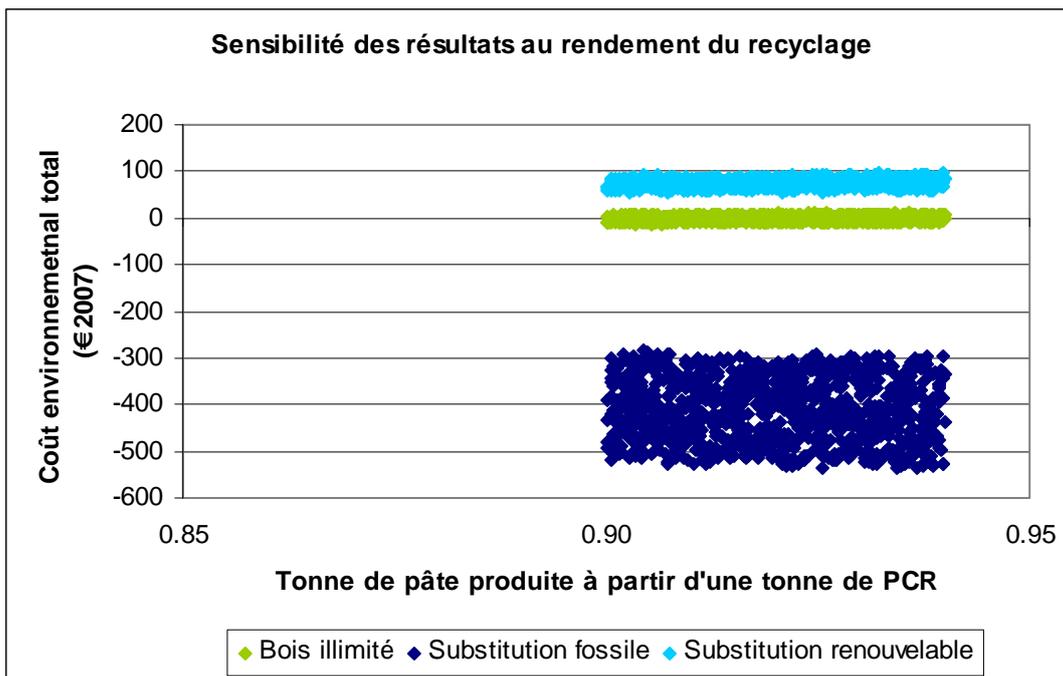


Figure 51 : Sensibilité des résultats au rendement du recyclage

La modélisation du recyclage des cartons d'emballages en carton ondulé ne fait que peu varier le rendement du recyclage. Les résultats sont donc peu influencés, la marge de variation étant limitée.

Le scénario 2a est le plus sensible à cette variation, la production évitée de chaleur par des sources fossiles étant proportionnelle au rendement du recyclage.

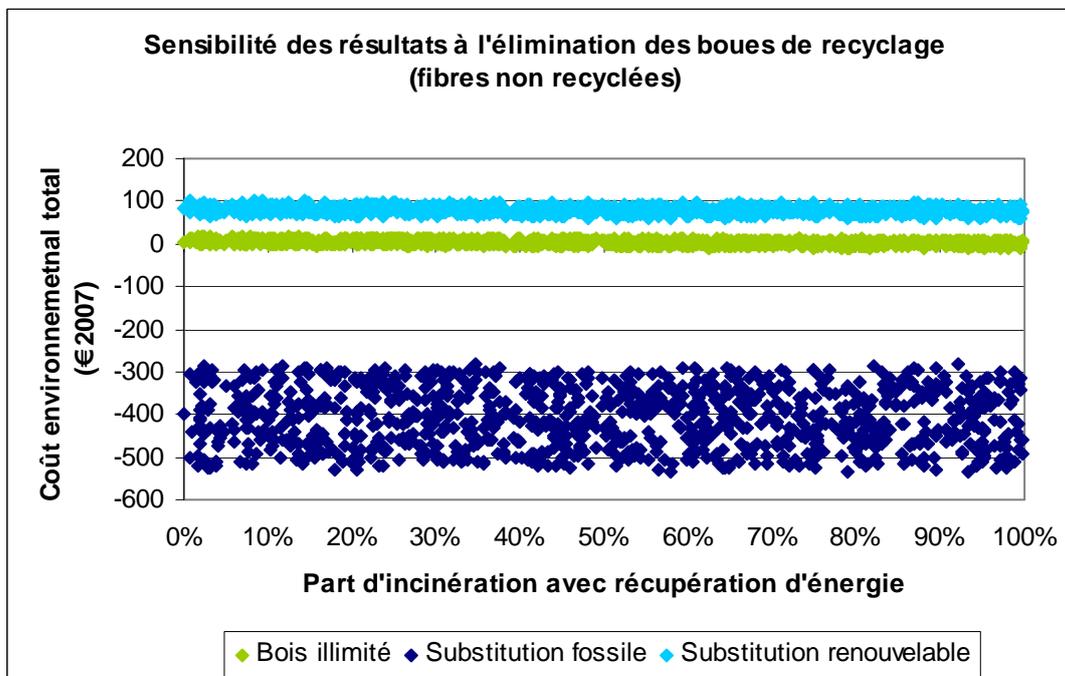


Figure 52 : Sensibilité des résultats à la fin de vie des boues de recyclage

Le type d'élimination des boues de recyclage influe très peu sur le coût environnemental total. Les impacts sont très légèrement plus favorables lorsque les boues sont incinérées avec récupération de chaleur.

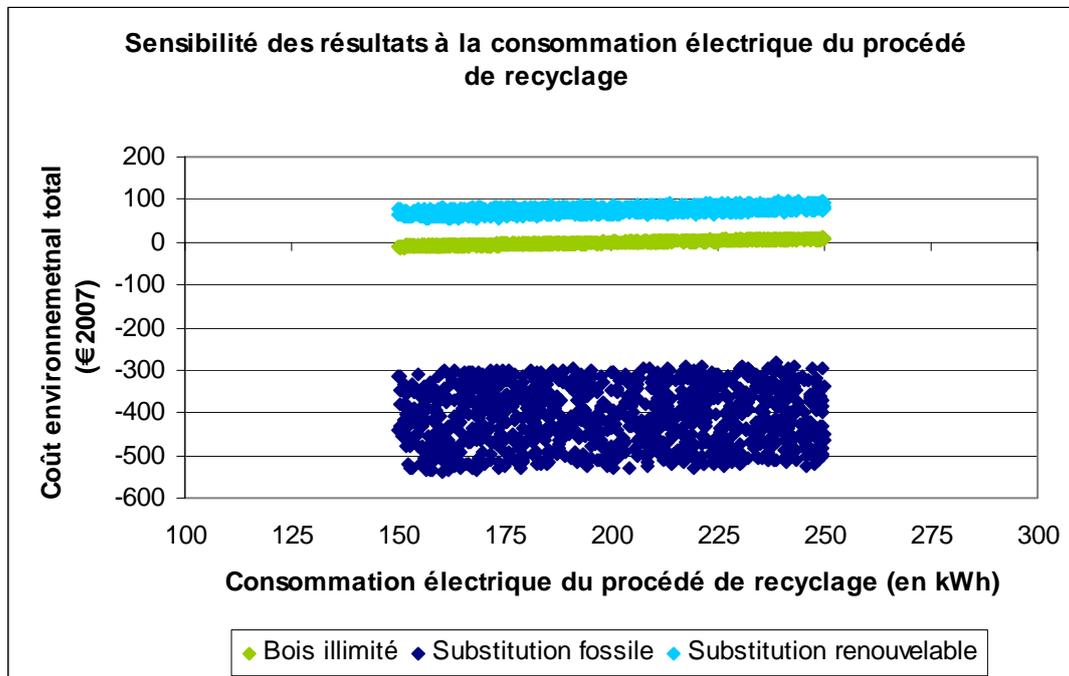


Figure 53 : Sensibilité des résultats à la consommation d'électricité du procédé de recyclage

Les consommations du procédé de recyclage influencent le résultat de façon modérée. Pour un champ de valeur allant de 150 à 250 kWh par tonne recyclée, l'écart de coût environnemental total est d'environ 30 €.

IV.3.4.4 Variantes liées à la monétarisation de l'effet de serre

Ces variantes portent sur deux paramètres :

- Cas de base :
 - Le coût environnemental lié aux émissions de CO₂ est internalisé à 100 % pour le CO₂ et à 0 % pour les autres GES.
 - La tonne de CO₂ vaut 20 €
- Variation sur le degré d'internalisation (ne concerne que le coût externe) :
 - 0 % du coût environnemental des émissions de GES sont internalisés
 - 100 % du coût environnemental des émissions de GES sont internalisé
- Variation sur le facteur de monétarisation des émissions de GES³¹ :
 - La tonne de CO₂ vaut 50 €
 - La tonne de CO₂ vaut 96 €

Le tableau ci-dessous se base sur les données pour un mix électrique 100 % nucléaire.

³¹ Ces valeurs sont discutées plus en détails au point II.2.4.

Scénario	Coût de la tonne de CO ₂ équivalent		Coût environnemental total	Coût externe		
				0% d'internalisation pour tous les GES	100% d'internalisation CO ₂ , 0% pour autres GES	100% d'internalisation pour tous les GES
Scénario 1 : ressources en bois illimitées	Objectif Kyoto	20 €/t CO ₂ eq.	- 1 €	- 35 €	- 41 €	- 43 €
	Objectif durabilité, valeur basse	50 €/t CO ₂ eq.	11 €	- 23 €	- 39 €	- 43 €
	Objectif durabilité, valeur haute	96 €/t CO ₂ eq.	30 €	- 4 €	- 35 €	- 43 €
Scénario 2a : Substitution d'énergie fossile	Objectif Kyoto	20 €/t CO ₂ eq.	- 408 €	- 234 €	- 202 €	- 202 €
	Objectif durabilité, valeur basse	50 €/t CO ₂ eq.	-457 €	- 282 €	- 204 €	- 202 €
	Objectif durabilité, valeur haute	96 €/t CO ₂ eq.	-531 €	- 357 €	- 205 €	- 202 €
Scénario 2b : Substitution d'énergie renouvelable	Objectif Kyoto	20 €/t CO ₂ eq.	76 €	44 €	38 €	36 €
	Objectif durabilité, valeur basse	50 €/t CO ₂ eq.	87 €	55 €	40 €	36 €
	Objectif durabilité, valeur haute	96 €/t CO ₂ eq.	104 €	72 €	44 €	36 €

Tableau 57 : Résultats selon la monétarisation de l'effet de serre

Le tableau ci-dessus montre que la valeur du facteur de monétarisation des gaz à effet de serre peut influencer fortement le coût environnemental total et le coût environnemental externe en cas d'internalisation nulle ou limitée au CO₂.

Pour les scénarios 1 et 2b, l'internalisation des coûts liés aux gaz à effet de serre engendre une diminution du coût (ou une augmentation du gain, suivant les cas) liés au recyclage. À l'inverse, dans le scénario 2a, l'internalisation des émissions engendre un coût externe plus élevée (bénéfice moins important). Ceci est lié au fait que la substitution de sources de chaleur fossiles par le bois permet une diminution des émissions de CO₂ fossile et donc un gain environnemental. Lorsque ce gain est internalisé, le coût externe augmente.

IV.3.4.5 Variantes liées à la monétarisation des consommations de ressources énergétiques

Cette variante porte sur deux paramètres :

- La valeur du facteur de monétarisation, qui varie de 20 % par rapport à la valeur du Guide de monétarisation
- Le taux d'internalisation des coûts environnementaux liés à la consommation d'énergie, sur base de trois valeurs du baril de pétrole :
 - Le baril est à 64 \$, ce qui est la valeur retenue dans le Guide de monétarisation
 - Le baril est à 100 \$, ce qui correspond à la valeur courant septembre 2008

- Le baril est à 150 \$, ce qui correspond à une hypothèse de prix élevés à long terme (record de 147 \$ en juillet 2008)

Les résultats de ces variations sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Scénario	Valeur du facteur de monétarisation	Coût environnemental total	Coût externe		
			Baril à 64 \$	Baril à 100 \$	Baril à 150 \$
Scénario 1 : ressources en bois illimitées	0,012 €/MJ	- 14 €	- 54 €	- 73 €	- 73 €
	0,015 €/MJ	- 1 €	- 41 €	- 61 €	- 73 €
	0,018 €/MJ	13 €	- 27 €	- 47 €	- 73 €
Scénario 2a : Substitution d'énergie fossile	0,012 €/MJ	- 343 €	- 171 €	- 48 €	- 48 €
	0,015 €/MJ	- 408 €	- 202 €	- 104 €	- 48 €
	0,018 €/MJ	- 474 €	- 242 €	- 174 €	- 48 €
Scénario 2b : Substitution d'énergie renouvelable	0,012 €/MJ	63 €	26 €	9 €	9 €
	0,015 €/MJ	76 €	38 €	20 €	9 €
	0,018 €/MJ	88 €	51 €	33 €	9 €

Tableau 58 : Résultats selon la monétarisation consommations d'énergie

Remarque :

Dans certaines configurations, le coût interne de la consommation d'énergie dépasse le coût environnemental total. Les chiffres présentés reposent sur le principe qu'un coût internalisé ne peut dépasser (en valeur absolue) le coût environnemental total. Le taux d'internalisation est plafonné à 100 % (voir section II.2.5.2).

IV.3.5. Recyclage de papier de bureau (*high grade*)

Unité fonctionnelle = Recyclage d'une tonne de papier d'impression de bureaux pour fabriquer du papier sanitaire

IV.3.5.1 Résultats globaux

Les résultats reprenant les différents scénarios et les différents mix sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Mix électrique	Scénario 1	Scénario 2a	Scénario 2b
100 % nucléaire	+ 103 €	- 211 €	+ 161 €
100 % gaz	+ 107 €	- 209 €	+ 165 €
100 % charbon	+ 115 €	- 201 €	+ 173 €
100 % renouvelable	+ 84 €	- 232 €	+ 142 €

Tableau 59 : Coût environnemental total du recyclage de papier de bureau en pâte à papier sanitaire

Les résultats sont fortement influencés par les scénarios choisis, à l'inverse, le mix électrique n'a qu'une incidence négligeable. En effet, la production de pâte vierge a une consommation électrique limitée. La figure ci-dessous met en évidence ces ordres de grandeur.

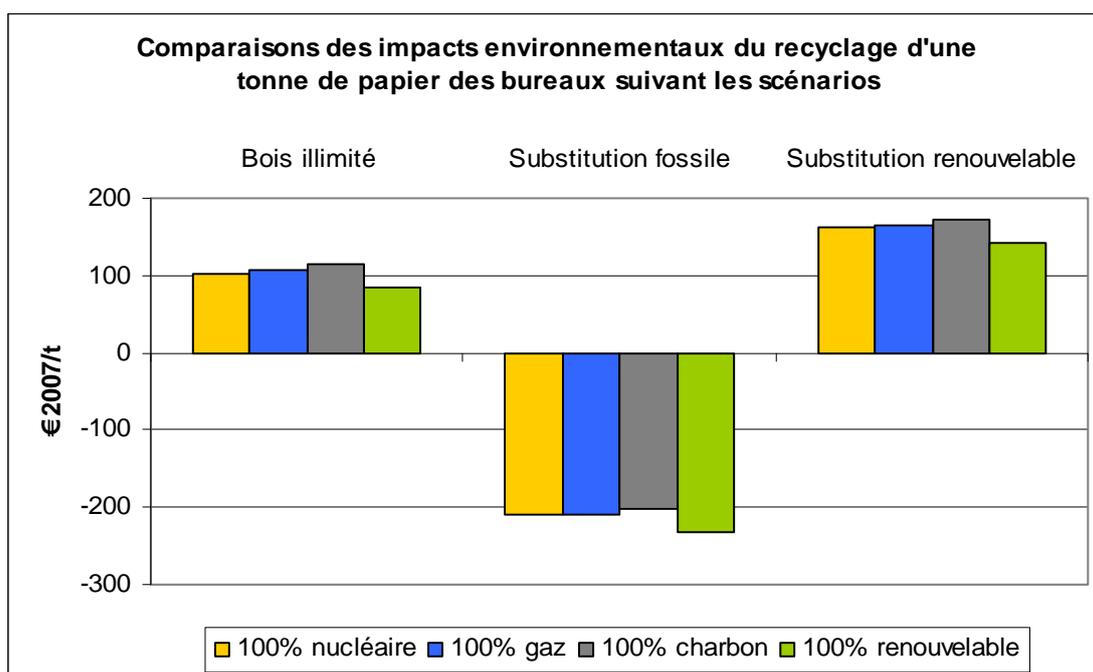


Figure 54 : Impacts monétarisés du recyclage d'une tonne de papier de bureaux

Sur cette figure, les impacts de chaque combinaison scénario/mix électrique sont exprimés par rapport au scénario 2a avec un mix 100 % nucléaire. Les grandes tendances de cette figure sont :

- L'homogénéité des résultats quel que soit le mix électrique

La production de pâte vierge ne consomme que très peu d'électricité (70 kWh par tonne de pâte produite). Ainsi, bien que les mix électriques varient, les impacts de la production évitée restent très similaires.

- L'importance du choix de scénario

Le scénario 2a, où le bois non utilisé se substitue à une source de chaleur fossile, est le seul à aboutir à un bénéfice environnemental. Les scénarios 1 et 2b engendrent des coûts environnementaux.

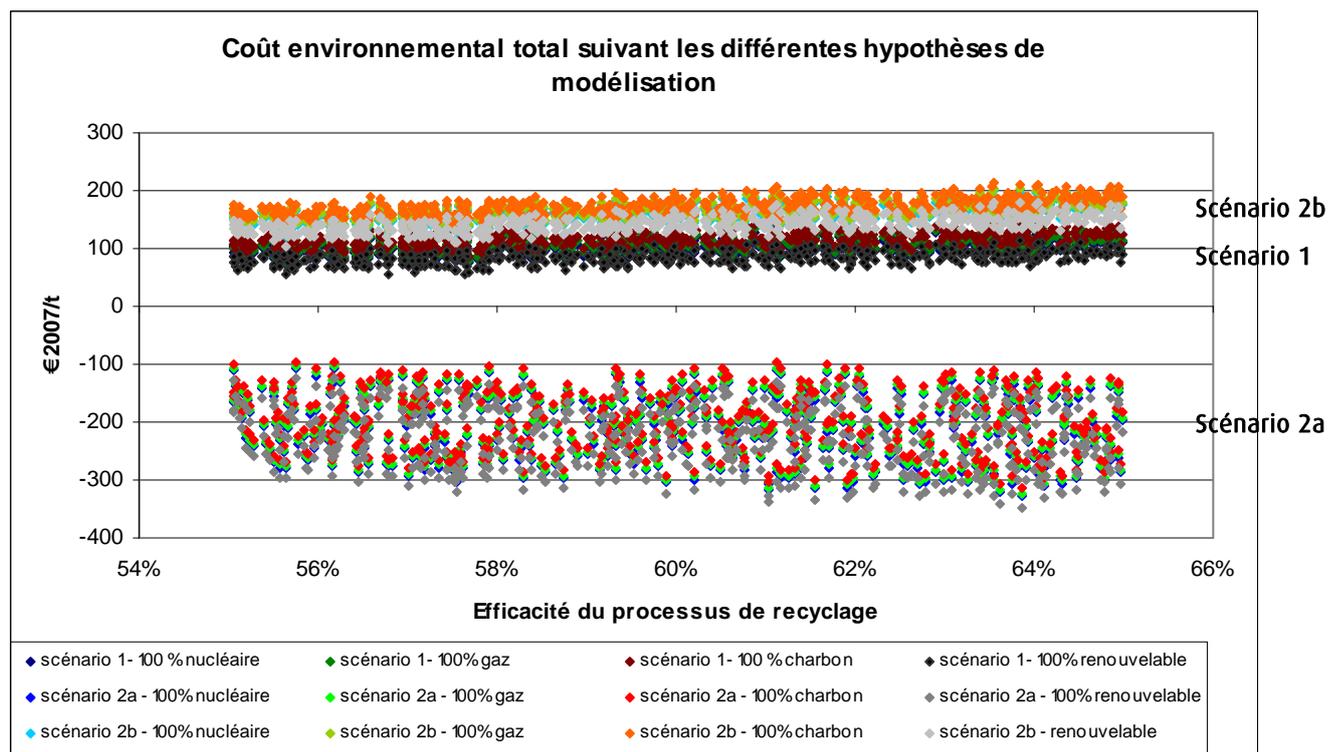


Figure 55 : Coût environnemental total pour l'ensemble des cas étudiés

La figure ci-dessus illustre l'ensemble des couples scénario/mix électrique. Il est possible de distinguer deux nuages de points. Le premier, correspond aux scénarios 1 et 2b, il s'agit du nuage au dessus de l'axe des abscisses ; le deuxième nuage se situe entre un bénéfice environnemental de - 100 et - 300 €/t et correspond au scénario 2a.

Compte tenu des comportements similaires quel que soit le mix électrique, seul le cas 100 % nucléaire est décomposé par phase et par catégorie d'impacts. Les résultats et les tendances sont alors extrapolables aux autres mix, sachant que ces scénarios jouent sur les émissions de CO₂ fossile.

IV.3.5.2 Coût environnemental total

A. Résultats par étapes

La différence entre les scénarios est liée à l'utilisation alternative du bois, en effet il s'agit du seul paramètre variant d'un scénario à l'autre. La figure ci-dessous met en évidence les points suivants :

- L'utilisation alternative du bois reste l'élément principal dans le bilan des coûts environnementaux
- Le recyclage de ces papiers engendre un coût nettement plus élevée que pour les recyclages des autres PCR. Ce n'est pas tant le grade du PCR qui influe sur cet impact mais le débouché (pâte désencrée et blanchie pour production de papier sanitaire). Ce coût supplémentaire est cependant compensé par les étapes équivalentes dans la production évitée.
- Les transports sont négligeables, quel que soit le scénario considéré

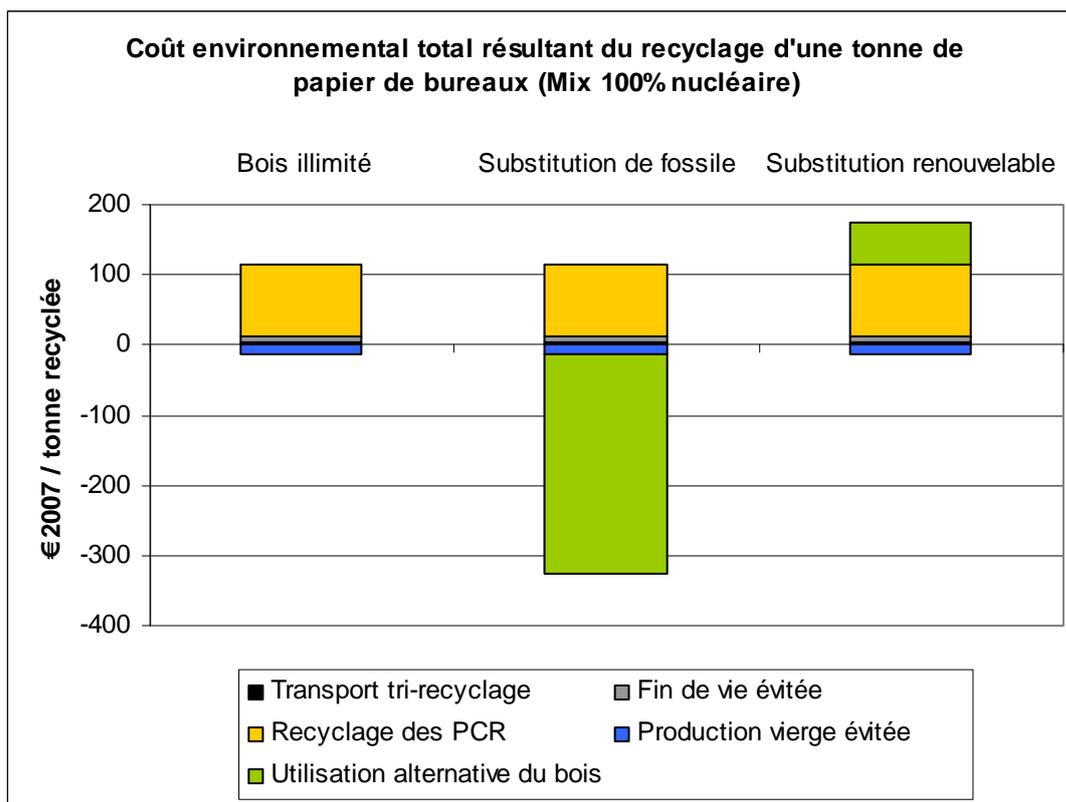


Figure 56 : Coût environnemental total du recyclage d'une tonne de papier de bureaux, détaillé par phase (mix 100 % nucléaire)

Dans le scénario 2a, le bénéfice environnemental de l'utilisation alternative du bois est la somme des impacts du bois brûlé en chaudière et de la production évite de chaleur à partir d'une source fossile. Dans ce cadre, le bilan est largement favorable, voir

Figure 54.

Le fort impact environnemental du procédé de recyclage est liée à des consommations d'énergie (chaleur et électricité) nettement plus élevées que pour des recyclages vers d'autres applications.

B. Résultats par catégorie d'impacts

Quel que soit le scénario, les catégories d'impact ayant une amplitude suffisante pour influencer sur le résultat final sont :

- La consommation de ressources naturelles, en particulier lorsque l'utilisation alternative du bois remplace de l'énergie fossile (scénario 2a)
- La toxicité humaine
- Les émissions de gaz à effet de serre

La consommation électrique de la production de pâte vierge étant très limitée, les résultats sont très proches pour l'ensemble des mix électriques.

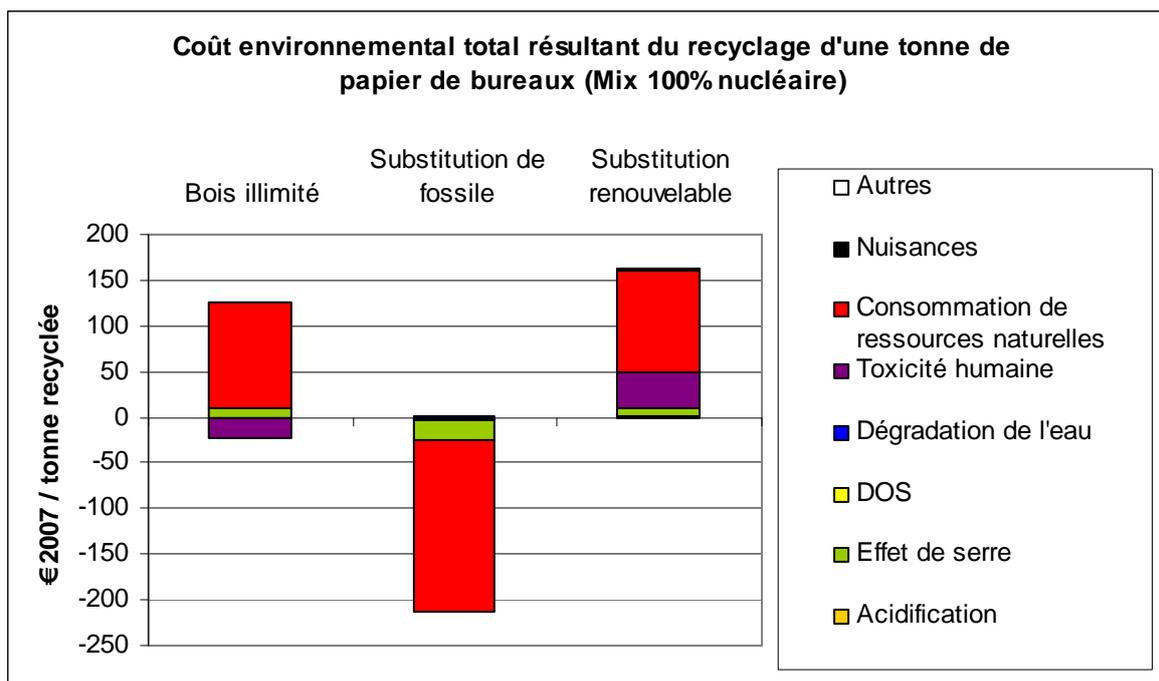


Figure 57 : Coût environnemental total du recyclage d'une tonne papier de bureaux, détaillé par catégorie d'impact (mix 100 % nucléaire)

Les tableaux ci-dessous présentent la décomposition des impacts par phase et par catégorie d'impact.

Phases	Acidification	Effet de serre	DOS	Dégradation de l'eau	Toxicité humaine	Consommation de ressources naturelles	Nuisances	Autres	Coût environnemental total
Transport tri-recyclage	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	2	2	> -1 et < 1	4
Fin de vie évitée	> -1 et < 1	-26	> -1 et < 1	-1	-3	38	> -1 et < 1	> -1 et < 1	9
Recyclage des PCR	1	12	> -1 et < 1	> -1 et < 1	12	78	> -1 et < 1	> -1 et < 1	103
Production vierge évitée	-1	23	> -1 et < 1	> -1 et < 1	-31	-1	-2	> -1 et < 1	-13
Utilisation alternative du bois	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1
Total	-1	9	> -1 et < 1	-1	-22	116	> -1 et < 1	> -1 et < 1	103

Tableau 60 : Décomposition des impacts du recyclage d'une tonne de papiers de bureaux, par phase et par catégorie d'impact (scénario 1, mix électrique 100 % nucléaire)

Phases	Acidification	Effet de serre	DOS	Dégradation de l'eau	Toxicité humaine	Consommation de ressources naturelles	Nuisances	Autres	Coût environnemental total
Transport tri-recyclage	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	2	2	> -1 et < 1	4
Fin de vie évitée	> -1 et < 1	-26	> -1 et < 1	-1	-3	38	> -1 et < 1	> -1 et < 1	9
Recyclage des PCR	1	12	> -1 et < 1	> -1 et < 1	12	78	> -1 et < 1	> -1 et < 1	103
Production vierge évitée	-1	23	> -1 et < 1	> -1 et < 1	-31	-1	-2	> -1 et < 1	-13
Utilisation alternative du bois	-2	-31	> -1 et < 1	> -1 et < 1	23	-303	> -1 et < 1	> -1 et < 1	-313
Total	-3	-22	> -1 et < 1	-1	1	-187	> -1 et < 1	> -1 et < 1	-211

Tableau 61 : Décomposition des impacts du recyclage d'une tonne de papier de bureaux, par phase et par catégorie d'impact (scénario 2a, mix électrique 100 % renouvelable)

Phases	Acidification	Effet de serre	DOS	Dégradation de l'eau	Toxicité humaine	Consommation de ressources naturelles	Nuisances	Autres	Coût environnemental total
Transport tri-recyclage	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	2	2	> -1 et < 1	4
Fin de vie évitée	> -1 et < 1	-26	> -1 et < 1	-1	-3	38	> -1 et < 1	> -1 et < 1	9
Recyclage des PCR	1	12	> -1 et < 1	> -1 et < 1	12	78	> -1 et < 1	> -1 et < 1	103
Production vierge évitée	-1	23	> -1 et < 1	> -1 et < 1	-31	-1	-2	> -1 et < 1	-13
Utilisation alternative du bois	1	-1	> -1 et < 1	> -1 et < 1	61	-4	> -1 et < 1	1	58
Total	1	9	> -1 et < 1	-1	40	112	> -1 et < 1	> -1 et < 1	161

Tableau 62 : Décomposition des impacts du recyclage d'une tonne de papier de bureaux, par phase et par catégorie d'impact (scénario 2b, mix 100 % nucléaire)

Concernant la catégorie gaz à effet de serre :

- Le fait d'éviter une incinération ou une mise en CSDU engendre un gain environnemental. En effet, ces fins de vie engendrent des émissions de CO₂ biogénique (incinération et CSDU) et de méthane biogénique (en faible quantité pour la part envoyée en CSDU). Pour rappel, la dégradation du papier en CSDU est considérée comme étant de 27 % à un horizon temporel de 100 ans.
- La production de pâte vierge évitée engendre un coût environnemental. Au stade de pâte, le papier garde une part importante de carbone capté dans le bois, de plus les usines de pâte kraft injectent de la chaleur et de l'électricité sur les réseaux de distribution.
- Les impacts de l'utilisation alternative du bois dépendent de ce à quoi il se substitue. Le bois brûlé en chaudière a un cycle quasiment neutre (à l'exception des transports et consommations impliqués dans la production), le carbone émis lors de la combustion correspondant au carbone capté lors de la croissance des arbres.

Ainsi, seule la source de chaleur évitée a un impact. Dans le cas d'une substitution de fossile, le bénéfice environnemental est conséquent ; à l'inverse, il est quasiment nul lorsque le bois brûlé remplace une source de chaleur renouvelable (panneaux solaires thermiques)

Concernant la catégorie toxicité :

- La production évitée de pâte vierge permet un bénéfice environnemental conséquent, à l'inverse, le procédé de recyclage engendre un coût, du fait des importantes consommations d'énergie et des émissions qui y sont liées.
- La production de chaleur à partir de bois a un coût environnemental plus élevé que les productions alternatives, qu'il s'agisse de sources renouvelables (écart très important) ou de sources fossiles (écart modéré).

Concernant la catégorie consommations de ressources naturelles :

- La fin de vie évitée représente un coût environnemental. La production de chaleur et d'électricité liée à la fin de vie (incinération), doit être compensée par des productions classiques, qui consomment des ressources naturelles.
- Le procédé de recyclage engendre des consommations de ressources naturelles, en particulier de ressources fossiles, pour la production de chaleur et d'électricité.
- La production évitée de pâte vierge a un bilan neutre. Les consommations de produits chimiques et les consommations d'énergie sont compensées par la chaleur et l'électricité injectées sur les réseaux de distribution.
- L'utilisation alternative du bois engendre un bénéfice environnemental. La source de chaleur substituée joue un rôle déterminant dans le bénéfice. Dans le cas d'une substitution de renouvelable, celui-ci est quasiment nul, alors qu'il est très important lorsque le bois se substitue à une source d'énergie fossile.

Concernant la catégorie nuisances :

- De manière générale, les nuisances n'ont qu'un impact très limité, cependant il convient de rappeler que seules les nuisances liées aux transports sont prises en compte (voir chapitre II.2.6). Ainsi, les nuisances liées aux usines ne sont pas prises en compte.

Les principales origines d'impacts favorables ou défavorables pour chaque scénario sont données dans le tableau ci-dessous.

	Fin de vie évitée	Production vierge évitée	Utilisation alternative du bois	Bilan global
Scénario 1 : bois illimité	Favorable à l'effet de serre (évite émissions de l'incinération et des CSDU) Défavorable en consommation de ressource (pas de production de chaleur de l'incinérateur) Neutre (ou très faible impact) pour les autres catégories	Défavorable à l'effet de serre : pas de carbone biogénique capté par la production de pâte et pas de surplus d'énergie injectée sur le réseau Très favorable en terme de ressource pour des productions d'électricité non-renouvelables (évite une consommation d'électricité) Favorable pour la toxicité (pas de consommation de produit chimique)	Non concerné	Effet de serre : légèrement défavorable Toxicité : Légèrement favorable Ressource : défavorable
Scénario 2a : substitution énergie fossile	Favorable à l'effet de serre (évite émissions des CSDU) Défavorable en consommation de ressource (pas de production de chaleur de l'incinérateur) Neutre (ou très faible impact) pour les autres catégories	Défavorable à l'effet de serre : pas de carbone biogénique capté par la production de pâte et pas de surplus d'énergie injectée sur le réseau Neutre pour la consommation de ressource : évite des consommations mais pas d'injection de chaleur et d'électricité sur les réseaux Favorable pour la toxicité (pas de consommation de produit chimique)	Favorable à l'effet de serre Très favorable aux consommations de ressource (pas de source fossile utilisée) Défavorable pour la toxicité (émissions de particules et de NO _x plus importantes que les chaudières classiques)	Effet de serre : légèrement favorable Toxicité : neutre Consommation de ressource : très favorable
Scénario 3 : substitution énergie renouvelable	Favorable à l'effet de serre (évite émissions des CSDU) Défavorable en consommation de ressource (pas de production de chaleur de l'incinérateur) Neutre (ou très faible impact) pour les autres catégories	Défavorable à l'effet de serre : pas de carbone biogénique capté par la production de pâte et pas de surplus d'énergie injectée sur le réseau Neutre pour la consommation de ressource : évite des consommations mais pas d'injection de chaleur et d'électricité sur les réseaux Favorable pour la toxicité (pas de consommation de produit chimique)	Neutre pour l'effet de serre Neutre pour les consommations de ressource Très défavorable pour la toxicité (émissions importantes de particules et de NO _x)	Effet de serre : légèrement défavorable Défavorable pour la toxicité Consommation de ressource : défavorable

Tableau 63 : Principaux contributeurs au bilan global des scénarios

C. Coût environnemental externe

Le coût environnemental externe diffère du coût environnemental pour les catégories d'impact suivantes :

- Effet de serre, où le CO₂ fossile est internalisé
- Consommations de ressources naturelles, qui sont partiellement internalisées

Le coût environnemental externe du recyclage d'une tonne de journaux, pour différentes combinaisons scénario/mix électrique, est présenté dans le tableau ci-dessous.

Mix électrique	Scénario 1	Scénario 2a	Scénario 2b
100 % nucléaire	34 €	- 89 €	95 €
100 % gaz	36 €	- 89 €	97 €
100 % charbon	42 €	- 83 €	103 €
100 % renouvelable	26 €	- 99 €	87 €

Tableau 64 : Coût environnemental externe du recyclage de papier de bureaux

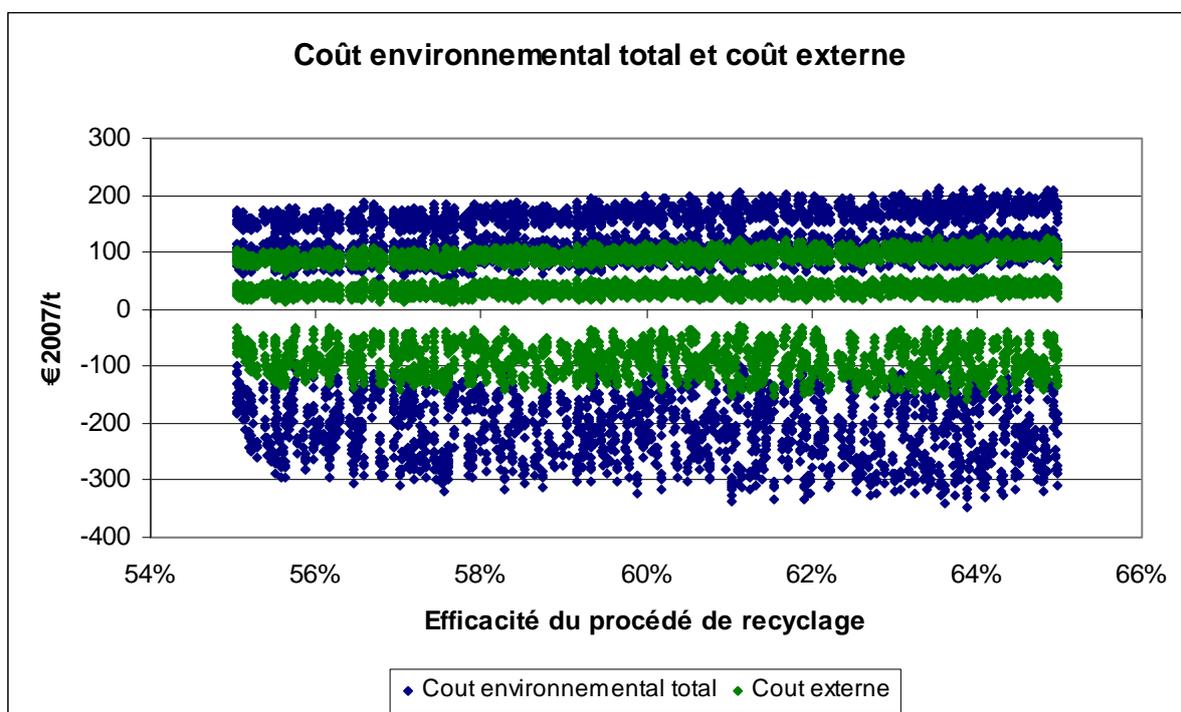


Figure 58 : Coût environnemental total et externe pour l'ensemble des couples scénario/mix électrique

En pratique, les coûts internalisés sont :

- Pour les émissions de gaz à effet de serre, seul le CO₂ fossile est internalisé. Celui-ci provient de la combustion d'énergie fossile ou d'une production d'électricité (basée sur des sources fossiles).
- Les consommations de ressources naturelles, sont internalisées en moyenne à hauteur de 50 % du coût environnemental. Les coûts internalisés sont donc d'autant plus importants que le coût environnemental total lié à la consommation de ressources est élevé, ce qui est particulièrement le cas du scénario 2a.

La contribution relative de la catégorie d'impact toxicité augmente toute fois étant donné qu'aucun impact n'est internalisé.

Dans l'ensemble, la structure des coûts externes n'est pas modifiée en profondeur par rapport aux coûts environnementaux totaux. Les catégories d'impacts ayant une influence sur le coût environnemental total restent les plus influentes en ce qui concerne le coût environnemental externe.

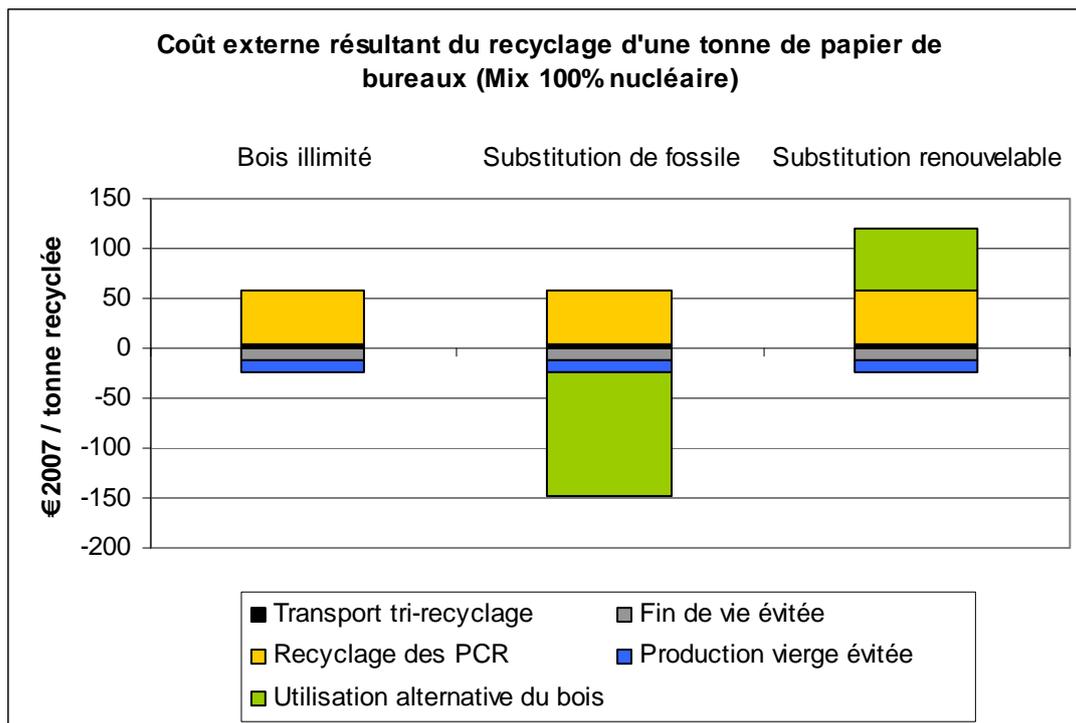


Figure 59 : Coût environnemental externe du recyclage d'une tonne de papier de bureaux , détaillé par phase (mix 100 % nucléaire)

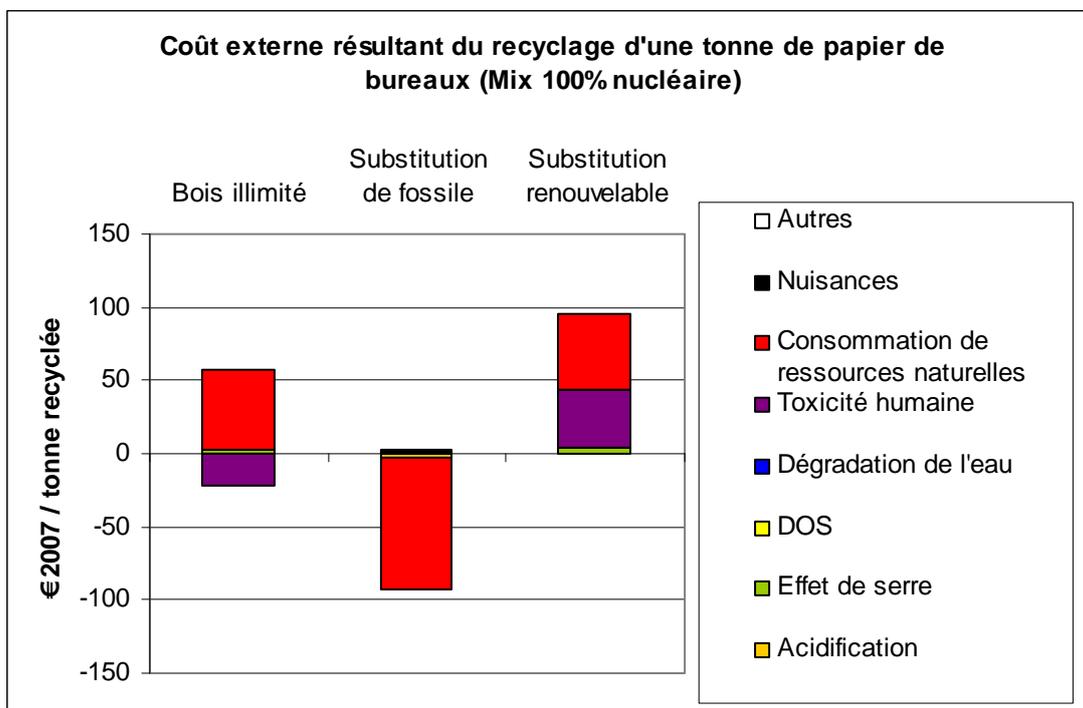


Figure 60 : Coût environnemental externe du recyclage d'une tonne de papier de bureaux, détaillé par catégorie d'impact

IV.3.5.3 Analyse de sensibilité des résultats

Outre les 3 scénarios et les mix électriques, l'influence de différents paramètres sur le bilan du recyclage est également testée.

Le tableau ci-dessous indique l'influence d'une variation réaliste des paramètres du modèle sur les résultats :

Paramètre	Intervalle de valeurs du modèle	Influence
Rendement des chaudières bois	55 à 85 %	Forte
Consommation électrique du procédé de recyclage	400 à 500 kWh/t output	Moyenne
Consommation de chaleur du recyclage	650 à 1100 MJ/t output	Moyenne
Efficacité de recyclage (rendement)	55 à 65 %	Moyenne
Élimination des boues de recyclage	100% incinération	Faible

Tableau 65 : Influence des paramètres

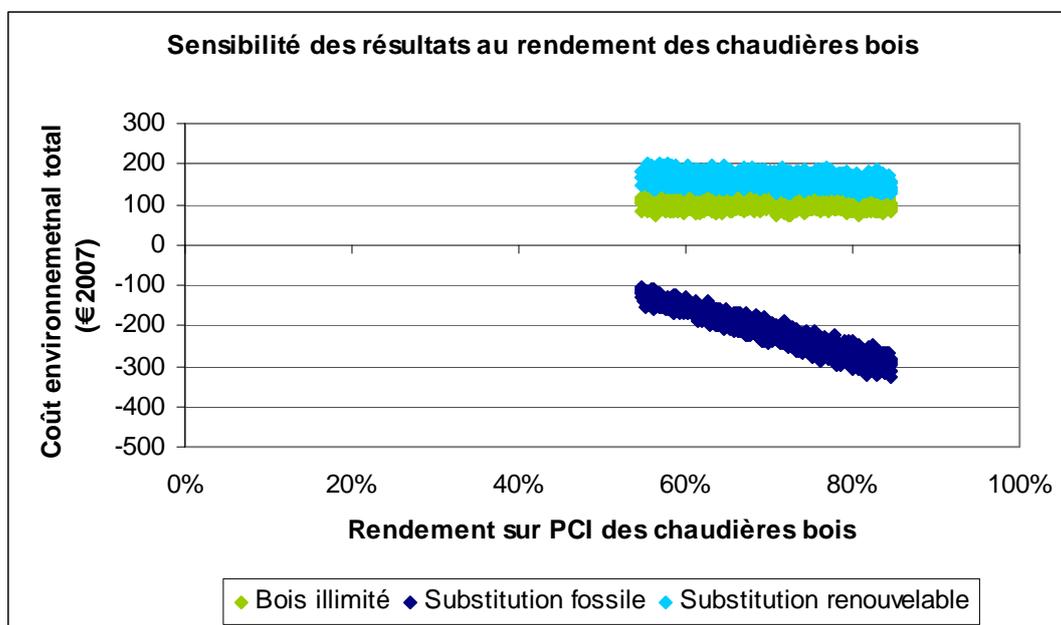


Figure 61 : Sensibilité des résultats au rendement des chaudières bois

Dans le modèle, les chaudières bois sont considérées comme ayant un rendement de 70 % sur PCI. Il s'agit de la valeur des procédés d'EcoInvent utilisés :

- heat, softwood logs, at furnace 100 kW
- heat, hardwood logs, at furnace 100 kW

Ce paramètre est particulièrement influent pour le scénario 2a où le bois non-utilisé remplace une production de chaleur par des sources d'énergie fossile.

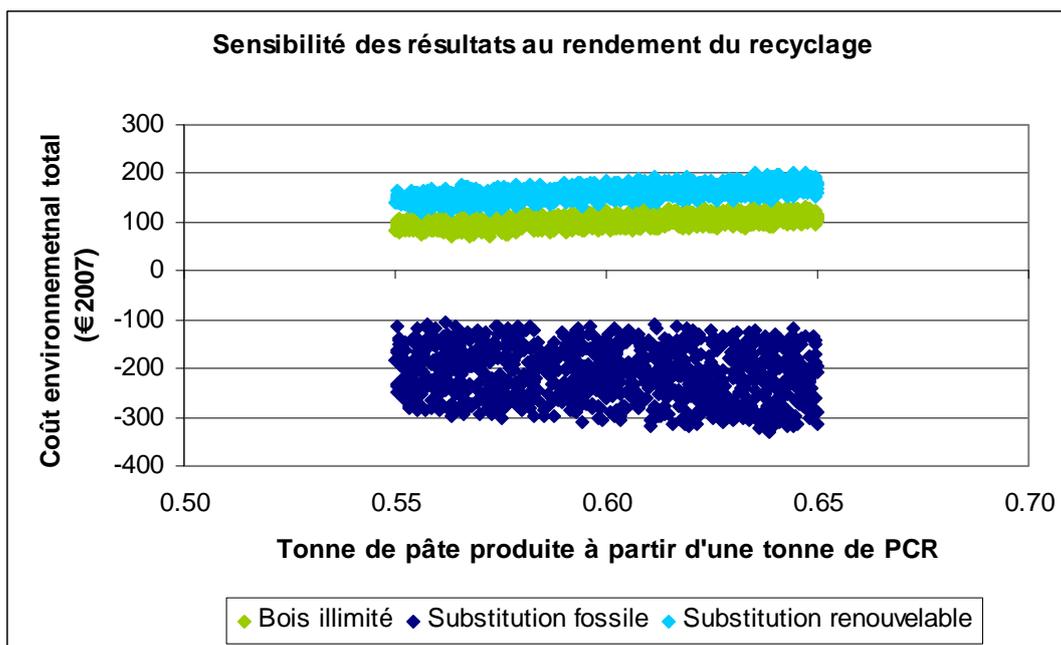


Figure 62 : Sensibilité des résultats au rendement du procédé de recyclage

Le rendement de recyclage des papiers de bureaux en papier sanitaire présente un rendement assez bas (autour de 60 %), ainsi, une variation de 5 points est proportionnellement plus importante que pour des recyclage d'autres papier où le rendement se situe entre 85 et 95 %.

Néanmoins, l'ordre de grandeur du coût environnemental reste le même au sein de la plage de variation.

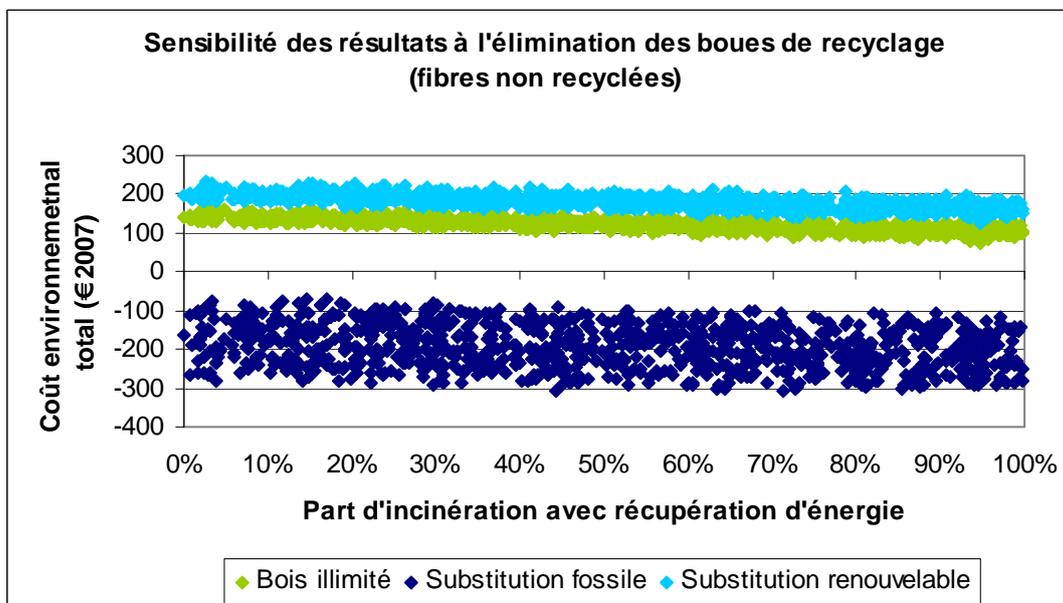


Figure 63 : Sensibilité des résultats au taux d'incinération des boues de recyclage

Le recyclage de PCR en papier sanitaire engendre des productions de boues de recyclage nettement plus élevées que lors de recyclage vers d'autres applications. L'élimination de ces boues est donc plus importante que dans les autres types de recyclage considérés.

L'ordre de grandeur reste néanmoins constant, au sein des variations.

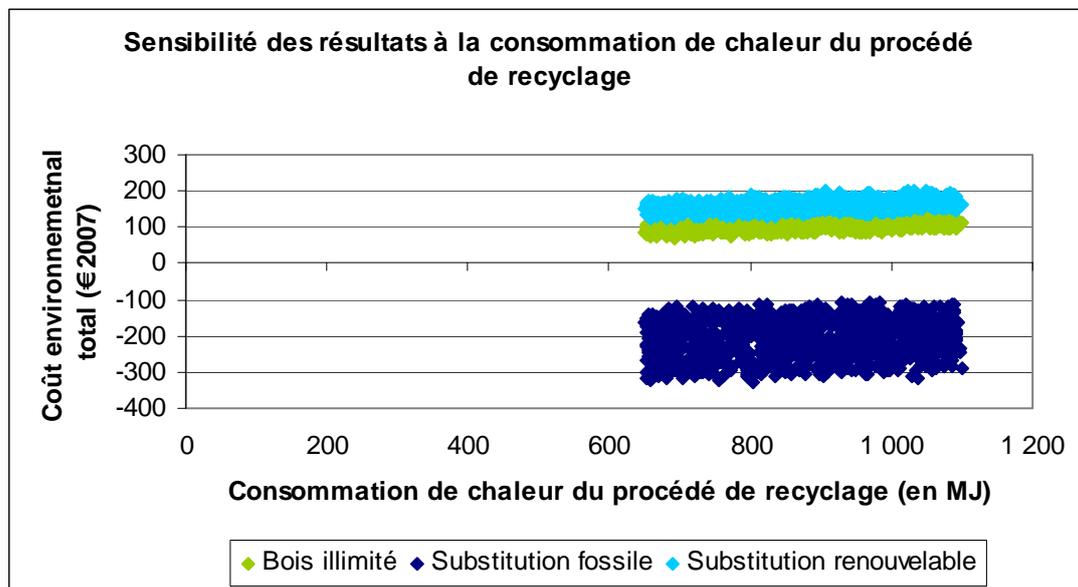


Figure 64 : Sensibilité des résultats aux consommations de chaleur du procédé de recyclage

Les consommations de chaleur du procédé de recyclage représentent un poste important. Leur variation influe sur la valeur totale mais n'engendre pas de changement d'ordre de grandeur.

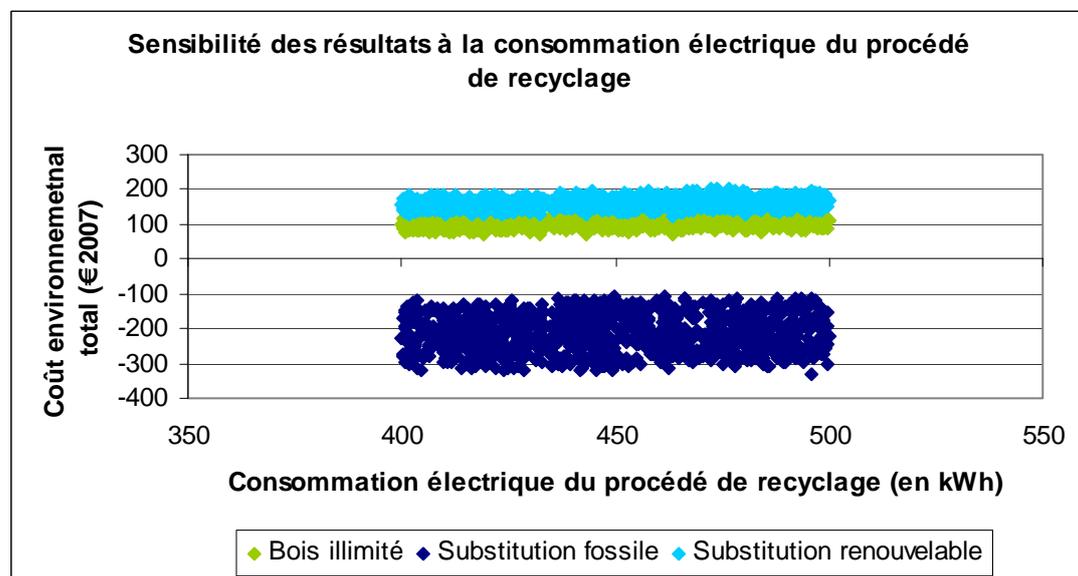


Figure 65 : Sensibilité des résultats à la consommation électrique du procédé de recyclage

Les consommations électriques du procédé de recyclage n'ont qu'une influence mineure sur la variation des résultats.

IV.3.5.4 Variantes liées à la monétarisation de l'effet de serre

Ces variantes portent sur deux paramètres :

- Cas de base :
 - Le coût environnemental lié aux émissions de CO₂ est internalisé à 100 % pour le CO₂ et à 0 % pour les autres GES.
 - La tonne de CO₂ vaut 20 €
- Variation sur le degré d'internalisation (ne concerne que le coût externe) :
 - 0 % du coût environnemental des émissions de GES sont internalisés
 - 100 % du coût environnemental des émissions de GES sont internalisés
- Variation sur le facteur de monétarisation des émissions de GES³² :
 - La tonne de CO₂ vaut 50 €
 - La tonne de CO₂ vaut 96 €

Le tableau ci-dessous se base sur les données pour un mix électrique 100 % nucléaire.

Scénario	Coût de la tonne de CO ₂ équivalent		Coût environnemental total	Coût externe		
				0% d'internalisation pour tous les GES	100% d'internalisation CO ₂ , 0% pour autres GES	100% d'internalisation pour tous les GES
Scénario 1 : ressources en bois illimitées	Objectif Kyoto	20 €/t CO ₂ eq.	103 €	41 €	35 €	31 €
	Objectif durabilité, valeur basse	50 €/t CO ₂ eq.	117 €	55 €	40 €	31 €
	Objectif durabilité, valeur haute	96 €/t CO ₂ eq.	138 €	76 €	48 €	31 €
Scénario 2a : Substitution d'énergie fossile	Objectif Kyoto	20 €/t CO ₂ eq.	- 211 €	- 112 €	- 89 €	- 91 €
	Objectif durabilité, valeur basse	50 €/t CO ₂ eq.	- 243 €	- 145 €	- 87 €	- 91 €
	Objectif durabilité, valeur haute	96 €/t CO ₂ eq.	- 293 €	- 195 €	- 84 €	- 91 €
Scénario 2b : Substitution d'énergie renouvelable	Objectif Kyoto	20 €/t CO ₂ eq.	161 €	101 €	95 €	92 €
	Objectif durabilité, valeur basse	50 €/t CO ₂ eq.	174 €	114 €	100 €	92 €
	Objectif durabilité, valeur haute	96 €/t CO ₂ eq.	195 €	135 €	108 €	92 €

Tableau 66 : Résultats selon la monétarisation de l'effet de serre

Le tableau ci-dessus montre que la valeur du facteur de monétarisation des gaz à effet de serre peut influencer fortement le coût environnemental total et le coût environnemental externe en cas d'internalisation nulle ou limitée au CO₂.

Pour les scénarios 1 et 3, l'internalisation des coûts liés aux gaz à effet de serre engendre une diminution du coût (ou une augmentation du bénéfice, suivant les cas) liés au recyclage.

³² Ces valeurs sont discutées plus en détails au point II.2.4.

À l'inverse, dans le scénario 2a, l'internalisation des émissions de gaz à effet de serre est guidée par des mécanismes plus complexes. En effet, le recyclage des papiers de bureaux :

- Évite des émissions de CO₂ fossile
- Engendre des émissions d'autres gaz à effet de serre

Ainsi, le coût externe est le plus élevée (ou plutôt le moins bénéficiaire) lorsque les seules émissions de CO₂ sont internalisées.

IV.3.5.5 Variantes liées à la monétarisation des consommations de ressources énergétiques

Cette variante porte sur deux paramètres :

- La valeur du facteur de monétarisation, qui varie de 20 % par rapport à la valeur du Guide de monétarisation
- Le taux d'internalisation des coûts environnementaux liés à la consommation d'énergie, sur base de trois valeurs du baril de pétrole :
 - Le baril est à 64 \$, ce qui est la valeur retenue dans le Guide de monétarisation
 - Le baril est à 100 \$, ce qui correspond à la valeur courant septembre 2008
 - Le baril est à 150 \$, ce qui correspond à une hypothèse de prix élevés à long terme (record de 147 \$ en juillet 2008)

Les résultats de ces variations sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Scénario	Valeur du facteur de monétarisation	Coût environnemental total	Coût externe		
			Baril à 64 \$	Baril à 100 \$	Baril à 150 \$
Scénario 1 : ressources en bois illimitées	0,012 €/MJ	79 €	13 €	- 19 €	- 19 €
	0,015 €/MJ	103 €	35 €	1 €	- 19 €
	0,018 €/MJ	126 €	59 €	25 €	- 19 €
Scénario 2a : Substitution d'énergie fossile	0,012 €/MJ	- 173 €	- 53 €	0 €	0 €
	0,015 €/MJ	- 211 €	- 89 €	- 32 €	0 €
	0,018 €/MJ	- 248 €	- 130 €	- 73 €	0 €
Scénario 2b : Substitution d'énergie renouvelable	0,012 €/MJ	139 €	75 €	44 €	44 €
	0,015 €/MJ	161 €	95 €	63 €	44 €
	0,018 €/MJ	184 €	119 €	86 €	44 €

Tableau 67 : Résultats selon la monétarisation des consommations d'énergie

Remarque :

Dans certaines configurations, le coût interne de la consommation d'énergie dépasse le coût environnemental total. Les chiffres présentés reposent sur le principe qu'un coût internalisé ne peut dépasser (en valeur absolue) le coût environnemental total. Le taux d'internalisation est plafonné à 100 % (voir section II.2.5.2).

IV.4 Synthèse

IV.4.1. Hypothèses de modélisation

Le tableau ci-dessous synthétise les hypothèses majeures pour chaque papier ou carton récupéré étudié.

Type de PCR	Unité fonctionnelle	Type de papier recyclé produit	Pâte vierge substituée	Rendement du procédé de recyclage (moyenne + intervalle entre parenthèses)	Utilisation alternative de la ressource bois	Mix électrique du pays de production de la pâte vierge évitée
Cartons pliants issus des ménages	recyclage d'une tonne supplémentaire de cartons pliants en France	Carton ondulé	Pâte kraft non blanchie	92 % (90-94 %)	3 scénarios : - la ressource bois est « illimitée » - la ressource bois est limitée, elle est en compétition avec les énergies fossiles - la ressource bois est limitée, elle est en compétition avec les ENR	4 mix étudiés : - 100 % nucléaire - 100 % gaz - 100% charbon - 100 % renouvelable (éolien)
Journaux issus des ménages	recyclage d'une tonne supplémentaire de journaux en France	Papier journal	Pâte thermo-mécanique blanchie	80 % (75-85%)		
Cartons ondulés issus des commerces	recyclage d'une tonne supplémentaire de cartons ondulés en France	Carton ondulé	Pâte kraft non blanchie	92 % (90-94%)		
Papiers de bureaux	recyclage d'une tonne supplémentaire de papiers de bureaux en France.	Papier sanitaire	Pâte kraft blanchie	60 % (55-65 %)		

Tableau 68 : Synthèse – Hypothèses de modélisation

IV.4.2. Résultats comparés

IV.4.2.1 Résultats moyens

Le tableau ci-dessous présente un récapitulatif des coûts environnementaux externes et totaux du recyclage pour chaque recyclage de PCR étudié. Ces coûts sont un résultat moyen sur base des données fournies et modélisées.

Note : Ces résultats correspondent à une situation donnée déterminée par un grand nombre d'hypothèses ainsi que par le choix de l'application. L'analyse de sensibilité permet d'évaluer leur robustesse au vu de la variabilité des situations.

Type de PCR	Type de papier recyclé produit	Scénario ressource bois	Coût environnemental total (€ 2007 / t)	Coût externe (€ 2007 / t)
Cartons pliants issus des ménages	Carton ondulé	1	10	- 36
		2a	- 401	- 198
		2b	86	42
Journaux et magazines issus des ménages	Papier journal	1	- 102	- 51
		2a	- 291	- 125
		2b	- 66	- 14
Cartons ondulés issus des commerces	Carton ondulé	1	-1	- 41
		2a	- 408	- 202
		2b	76	38
Papiers de bureaux	Papier sanitaire	1	103	34
		2a	- 211	- 89
		2b	+ 161	95

Tableau 69 : Bilan environnemental du recyclage des papiers cartons (Mix 100 % nucléaire)

Notes :

- Scénario 1 : ressource bois illimitée (la demande n'atteint jamais la capacité de production durable des forêts)
- Scénarios 2 : ressource bois limitée. Son utilisation entraîne indirectement une utilisation accrue de
 - scénario 2a : ressources fossiles
 - scénario 2b : ressources renouvelables
- Un "Coût environnemental total" négatif signifie que le recyclage crée un bénéfice environnemental
- Le "Coût externe" est le coût non supporté (ou le bénéfice non perçu) par les acteurs concernés de la chaîne de recyclage (y compris dans cette chaîne les producteurs de matières vierges substituées)

Le coût environnemental du recyclage des papiers cartons est fortement influencé par l'état du marché de la ressource bois. Les différents scénarios présentent en effet des résultats qui peuvent être opposés :

- Dans le cas du scénario 1 (ressource bois illimitée), le recyclage présente des coûts environnementaux variables suivant le type d'application :
 - Lorsque le papier recyclé se substitue à du carton ondulé, le recyclage est relativement neutre en terme de coût environnemental

- Lorsque le papier recyclé se substitue à du papier journal, le recyclage engendre un bénéfice environnemental de l'ordre de 100 €/2007/t
 - Lorsque les papiers récupérés servent à la production de papier sanitaire, le recyclage engendre un coût environnemental de l'ordre de 100 €/2007/t
- Scénario 2a : Lorsque la ressource bois est en compétition avec les ressources fossiles (pour la production d'énergie), le recyclage des PCR permet toujours un bénéfice environnemental substantiel, allant de 200 à 400 €/2007/t.
 - Scénario 2b : Lorsque la ressource bois est en concurrence avec d'autres énergies renouvelables (solaire thermique dans la modélisation), le recyclage engendre un coût environnemental (de 75 à 160 €/2007/t), sauf dans le cas du recyclage de journaux et magazines en papier journal (bénéfice de l'ordre de 70 €/2007/t).

Les coûts externes représentent de l'ordre de 50 % des coûts environnementaux totaux pour tous les papiers cartons sauf dans les cas où le recyclage a un très faible coût / bénéfice environnemental. Ceci est dû principalement à l'internalisation des coûts de l'énergie (diminution de la contribution à la catégorie d'impacts "consommation des ressources naturelles", qui est la catégorie la plus importante).

IV.4.2.2 Analyse de sensibilité

La valorisation alternative de la ressource bois a été identifiée pour tous les couples PCR / application comme étant le paramètre ayant la plus grande influence sur les résultats. Sur base de ce constat, trois scénarios relatifs à l'utilisation alternative du bois ont été modélisés, représentant diverses situations possibles de l'état du marché du bois. En outre, lorsque l'utilisation alternative du bois est une production de chaleur se substituant à une ressource fossile, un des paramètres les plus influents est le rendement des chaudières à bois considérées.

Le rendement des procédés de recyclage a également été identifié comme étant un paramètre ayant une forte influence. La variabilité entre les couples PCR/application est due à une différence de rendement des procédés, alors que la variabilité modélisée au sein d'un couple est liée à une incertitude sur sa valeur réelle. Dès lors, il est essentiel de prendre en considération :

- Le fait que les résultats correspondent uniquement à un couple « Papier récupéré / Application » et ne sont donc pas généralisables à l'ensemble des applications du recyclage d'un type de papier récupéré
- Les résultats pour toute une gamme de valeurs et non uniquement pour une valeur fixe du rendement du procédé de recyclage.

La pâte vierge substituée joue un rôle important, illustré par les résultats du recyclage des journaux en papier journal :

- Le recyclage des trois autres PCR (cartons pliants, cartons ondulés et papiers de bureaux) se substitue à une pâte kraft, ayant de faibles consommations d'énergie (certaines usines sont des producteurs nets d'énergie) mais consommant d'importantes quantités de bois.
- Le recyclage des journaux se substitue à une pâte thermo-mécanique, gourmande en énergie mais consommant peu de bois

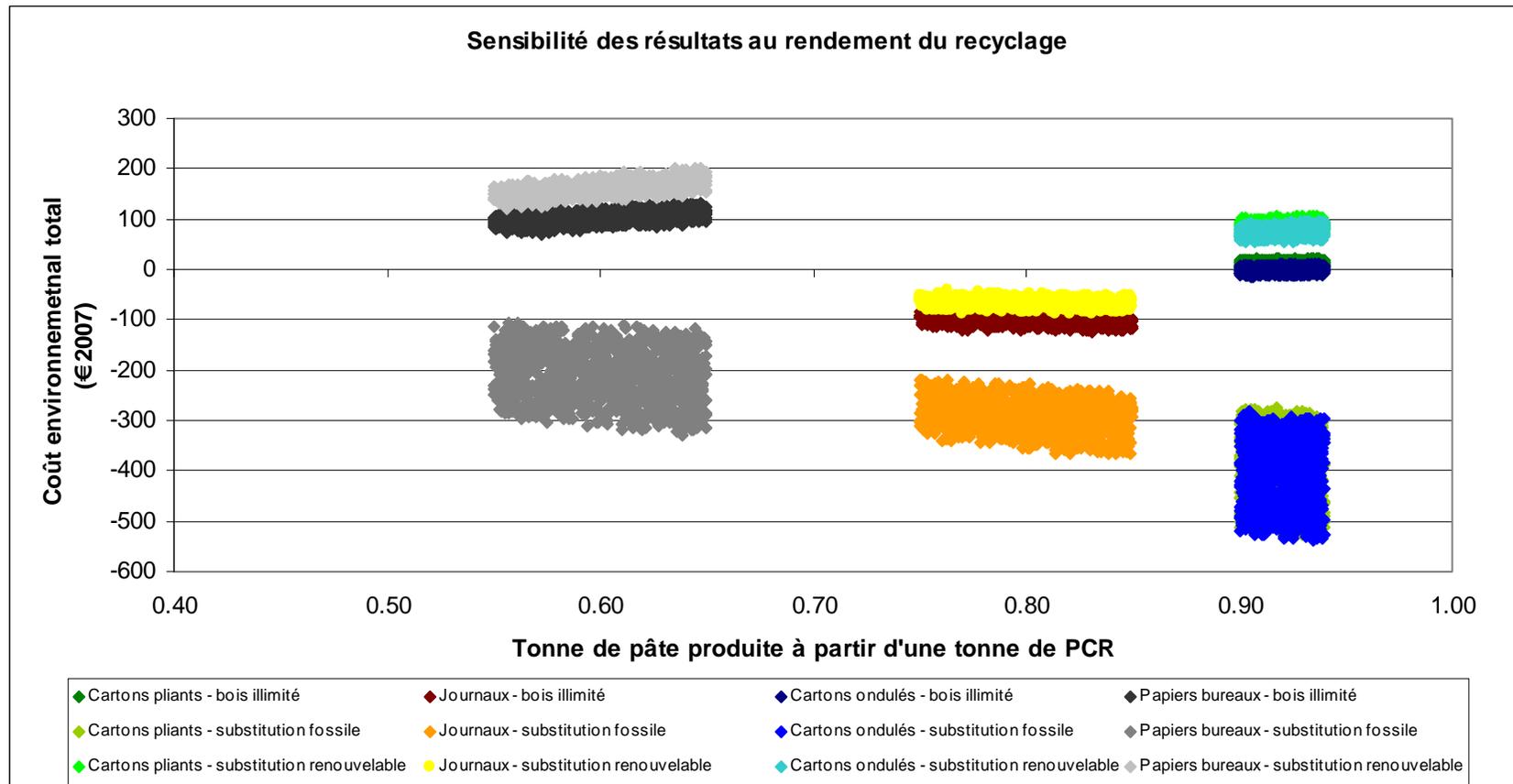


Figure 66 : Recyclage de tous les PCR – Sensibilité au rendement du procédé de recyclage

La figure ci-dessus présentent les résultats en fonction du type de PCR recyclé (cartons pliants, journaux, cartons ondulés ou papiers de bureaux).

V. Recyclage des plastiques

V.1 Généralités

V.1.1. Champ de l'étude

Le champ de l'étude est défini au chapitre III.1 et dans la figure ci-dessous :

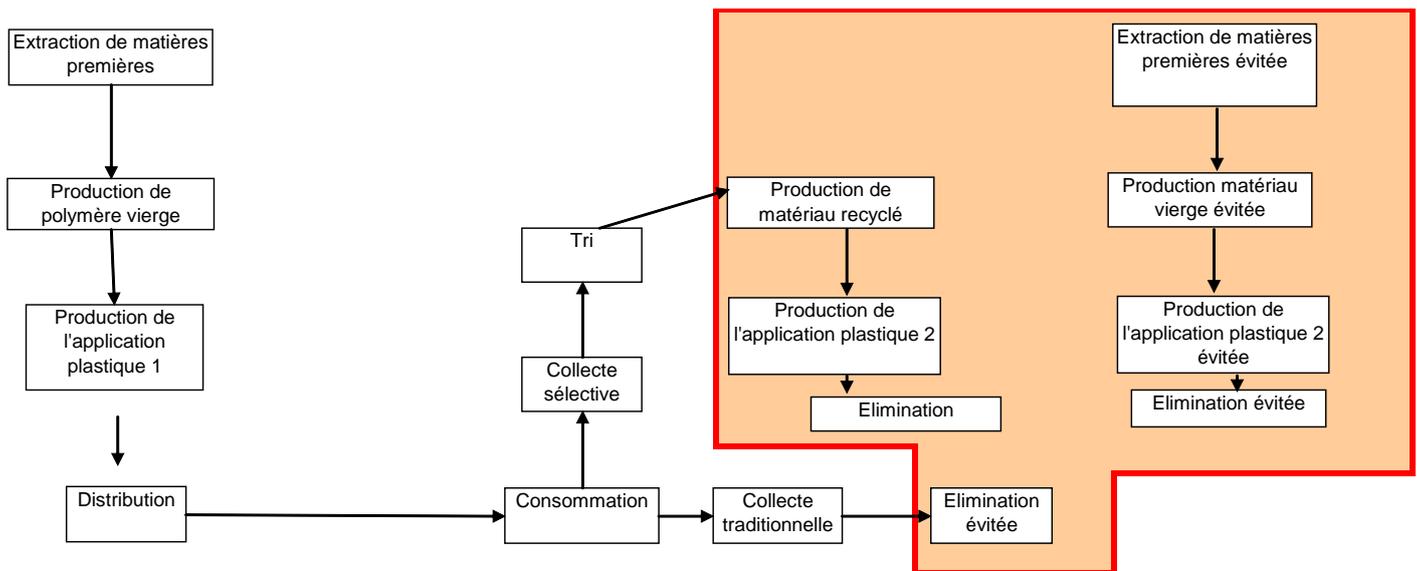


Figure 67 : Champ de l'étude pour les plastiques

Pour rappel, il part de la sortie du centre de tri à l'élimination finale du déchet et inclut l'économie, due au recyclage, de production et d'élimination de matière vierge.

Remarque sur l'efficacité du recyclage et le taux de substitution

Il ne faut pas confondre l'efficacité du recyclage et le taux de substitution de matière vierge par de la matière recyclée. L'efficacité du recyclage est le rendement de l'installation qui tient compte des pertes de matière lors du procédé de recyclage. Le taux de substitution est le rapport entre la quantité de matière remplacée et la quantité de matière recyclée nécessaire pour la remplacer. Il dépend de la différence de qualité entre le vierge et le recyclé.

Remarque sur les produits multi-matériaux

L'objectif de l'étude est d'évaluer le coût environnemental du recyclage des *plastiques*. Dès lors, bien que l'on étudie, pour chaque plastique, une application concrète, nous n'évaluons que le recyclage du plastique visé. Ainsi, lorsque le cas concret est un produit composé de plusieurs matériaux, le recyclage des autres matériaux constitutifs de l'application (exemple : les bouchons des bouteilles, le verre des vitres des châssis PVC...) n'est pas considéré dans cette étude. Cette limite claire est définie afin d'assurer l'extrapolabilité (éventuellement sous conditions) des résultats à d'autres applications.

Cependant, la décision de recycler une tonne supplémentaire d'un produit composé de plusieurs matériaux peut engendrer le recyclage combiné de ces différents matériaux. Dès lors, la prise de décision devra se baser sur une évaluation complète des bénéfices du recyclage de ce produit dans son ensemble. Par exemple, alors que les bénéfices du recyclage des différents matériaux constitutifs peuvent être insuffisants lorsqu'ils sont pris séparément, leur bénéfice combiné peut mener à un bilan favorable et à la décision de favoriser le recyclage du produit. Pour ces produits multi-matériaux, il conviendra d'analyser la pertinence du recyclage au cas par cas.

V.1.2. Etudes des marchés

Pour chaque plastique, l'état des marchés est étudié pour les deux raisons suivantes :

- Allocation des bénéfices du recyclage : L'étude de l'état du marché vise à évaluer quel sera l'équilibre entre l'offre et la demande en matière recyclée dans le futur. L'approche conséquentielle permet alors d'allouer les bénéfices du recyclage au système qui engendre réellement une augmentation du recyclage (et donc le bénéfice environnemental qui en découle) : le système amont (qui fournit la matière à recycler) et/ou le système aval (qui utilise la matière recyclée).
- Sélection du cas de figure particulier à étudier : les résines recyclées peuvent être utilisées dans plusieurs types d'applications. Il s'agit de sélectionner un cas particulier pour le calcul des bénéfices du recyclage. L'application sélectionnée correspond au cas de figure qui absorbera le plus probablement la quantité supplémentaire de résine recyclée mise sur le marché (= unité fonctionnelle). Il est caractérisé comme suit :
 - Dans quelle **application** la résine recyclée est-elle utilisée ?
Le choix de l'application n'est pas nécessairement celui de l'application la plus répandue actuellement. Il est fonction des secteurs d'application en croissance, qui absorberont de façon prioritaire un supplément d'offre. L'analyse de l'offre et de la demande vise à étudier les évolutions des secteurs absorbant de la matière recyclée.
 - Quel **matériau vierge** est remplacé ?
Selon les applications, le matériau recyclé peut être amené à remplacer de la même matière vierge ou un tout autre matériau.
 - Quel est le **taux de substitution** ?
Le taux de substitution représente le rapport entre la quantité de matière remplacée et la quantité de matière recyclée nécessaire pour la remplacer. Il dépend de la différence de qualité entre le vierge et le recyclé. La qualité du recyclat est définie et est censée convenir pour l'application considérée.

L'analyse détaillée des marchés est présentée à l'annexe 1.

Note : Cette analyse des marchés se fait en l'état des connaissances à un instant donné et correspond à l'état actuel du marché. Celui-ci qui ne restera pas nécessairement le même dans les prochaines années. Des évolutions technologiques peuvent offrir de nouveaux débouchés. Elles ne peuvent être toutes prédites. Dans ce cas, les bénéfices environnementaux du recyclage doivent être attribués à ce nouveau débouché (voir chapitre III.3.1).

V.1.3. Hypothèses de modélisation communes

Certaines hypothèses sont communes à tous les matériaux plastiques dans la mesure où il s'agit de l'approche méthodologique générale ; elles sont présentées ici. D'autres sont détaillées par flux car elles sont spécifiques au plastique considéré (notamment les procédés de recyclage, les efficacités de ces procédés et les taux de substitution).

Notons que dans tous les cas les polymères étudiés sont dérivés de carbone fossile.

V.1.3.1 Fin de vie évitée

La fin de vie évitée grâce au recyclage est une fin de vie moyenne des déchets en France.

Même si le parc d'incinérateurs ne couvre qu'un peu plus de la moitié des besoins, cette donnée globale représente un ensemble de situations où soit 100 % des déchets sont enfouis ou incinérés selon que les collectivités locales aient ou non un incinérateur. Dans la mesure où les transports des déchets ménagers sont limités on peut faire l'hypothèse que ces collectivités sont cloisonnées et que celles avec incinérateur ont chacune une petite réserve de capacité pour satisfaire leurs besoins. Dès lors, une diminution de la quantité de plastiques dans le flux de déchets va libérer des capacités d'incinération qui ne seront pas exploitées.

Deux cas se présentent dans les plastiques étudiés :

- Soit ce flux est intégré dans un flux de collecte de déchets ménagers résiduels (ex : PET, PEHD, PS thermoformé, ABS). Dans ce cas, la fin de vie modélisée est celle de la fin de vie traditionnelle des déchets ménagers.

Elle est modélisée par la situation actuelle (source ITOM 2006):

- 53 % d'incinération. La récupération d'énergie moyenne au niveau des incinérateurs implique les rendements suivants :

- Énergie électrique récupérée : 8 % (ratio de la quantité d'énergie livrée au réseau sous forme d'électricité et de la quantité d'énergie libérée par la combustion)
- Énergie thermique récupérée : 19,7 % (ratio de la quantité d'énergie thermique livrée au réseau sous forme de vapeur ou d'eau chaude et de la quantité d'énergie libérée par la combustion)
- PCI du PET : 22,95 MJ / kg (source Eco Invent)
- PCI du PEHD et PEBD : 42,47 MJ / kg (source Eco Invent)
- PCI du PVC : 21,51 MJ / kg
- PCI du PS : 38,67 MJ / kg

- 47 % de mise en décharge (le biogaz n'est pas valorisé).

Cette situation actuelle semble stable dans le temps et est donc considérée comme représentative d'une situation future.

- Soit ce flux est intégré dans un flux de collecte de déchets non-ménagers résiduels (ex : PEBD, PVC). Dans ce cas, la fin de vie modélisée est celle de la fin de vie traditionnelle des déchets non-ménagers concernés.

Elle est modélisée par :

- Déchets plastiques des commerces (ex : PEBD) ³³ :
 - 80 % décharge
 - 20 % incinération
- Déchets du BTP (ex : PVC)
 - 100 % décharge de déchets inertes

Cette situation actuelle est stable dans le temps et est donc considérée comme représentative d'une situation future.

V.1.3.2 Production d'énergie

A. Production d'électricité évitée grâce à l'incinération des déchets

L'énergie électrique récupérée aux incinérateurs remplace une production d'énergie électrique française. Elle est modélisée par le mix consécutif électrique français (typologie de consommation continue).

Nucléaire	Charbon	Gaz	Fuel	Hydraulique	Eolien	Autres SER
100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%

Tableau 70 : Mix électrique consécutif français (consommation continue)

³³ Source : Etude ADEME Evaluation de la production nationale des déchets des entreprises en 2004, ADEME.

B. Électricité utilisée lors du recyclage et de la production

Le marché du recyclage des plastiques est à l'échelle européenne. Nous utilisons donc dans ce cadre un mix conséquentiel européen pour modéliser les consommations d'électricité des procédés de recyclage et pour les consommations d'électricité évitées par la non-production de résine vierge. Ce type de procédés industriels fonctionnant en continu, le mix électrique sélectionné est un mix de production continue.

Nucléaire	Charbon	Gaz	Fuel	Hydraulique	Eolien	Autres SER
49.7%	50.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%

Tableau 71 : Mix électrique conséquentiel européen (consommation continue)

Concernant les consommations d'électricité :

- Recyclage : les données utilisées sont celles issues de visites d'installations de recyclage.
 - Mix électrique considéré : le mix conséquentiel européen est toujours utilisé.
- Production des matériaux vierges et des produits incorporant la matière vierge ou recyclée : les données utilisées sont celles de la littérature et des bases de données.
 - Mix électrique considéré : partout où il a été possible de le faire, les procédés issus de bases de données ont été adaptés (prise en compte d'un mix électrique européen conséquentiel plutôt que moyen). Dans certains cas cependant, les données fournies par les bases de données étaient agrégées et cette adaptation n'a pas été possible.

Le tableau ci-dessous récapitule les différents procédés utilisés pour la production, et précise pour lesquels le mix conséquentiel européen a été utilisé.

Matériaux	Etape considérée	Procédé utilisé	Mix considéré par le procédé	Adaptation au mix électrique conséquentiel
PET	Production de PET vierge	PET « bottle grade » (N°1828 EcoInvent, V2 2007)	Moyen européen	Oui
	Injection-soufflage de bouteilles PET	Source RDC Environnement : entre 1,63 et 1,9 kWh /kg PET ³⁴	Pas de mix	Oui
PEHD	Production de PEHD vierge	Eco-profiles of the European Plastics Industry, (Boustead for PlasticsEurope, Mars 2005)	Moyen européen (données agrégées)	Non
	Extrusion-soufflage de flacons de PEHD	Source RDC environnement : 1,43 et 1,95 kWh / kg PEHD extrudé.	Pas de mix	Oui
	Extrusion de tuyau	Extrusion plastic pipes (N°1851, EcoInvent,V2 2007)	Moyen européen	Oui
PEBD	Production de PEHD vierge	LDPE granulate at plant (N°1830, EcoInvent,V1.3 2006)	Moyen européen (données agrégées)	Non
	Extrusion de film	Extrusion plastic films (N°1850, EcoInvent,V2 2007)	Moyen européen	Oui
PVC	Production PVC vierge	PVC suspension (N°1843 EcoInvent, V2, 2007)	Moyen européen (données agrégées)	Non
	Production de châssis de fenêtre	Injection moulding (EcoInvent N°1853) Extrusion plastic pipes (EcoInvent N°1851)	Moyen européen Moyen européen	Oui Oui
PS	Production de panneau de particules	Particle board production (N°2482, EcoInvent V1.3, 2005)	Moyen européen Données agrégées	Oui
	Extrusion de PS	Extrusion plastic pipes (N°1851, EcoInvent,V2 2007)	Moyen européen	Oui
	Production de panneaux de particules	Particle board, indoor use (N° 2482, EcoInvent, V2 2007)	Moyen européen	Oui
ABS	Production d'ABS vierge	ABS at plant (N° 1817, EcoInvent V2 2007)	Moyen européen (données agrégées)	non
	Injection moulage	Injection molding (N°1853, EcoInvent,V2 2007)	Moyen européen	Oui

Tableau 72 : Procédés utilisés et adaptation aux mix électriques conséquentiels

³⁴ Source Plastics Europe : 1,803 kWh/kg polymère.

C. Production de chaleur évitée grâce à l'incinération des déchets

Comme le mix de production de chaleur est relativement stable en France et assez bien réparti géographiquement, le mix moyen est une approximation raisonnable du mix conséquentiel.

La production de chaleur évitée en France est donc basée sur le mix moyen français, à savoir :

- 11 % charbon ;
- 19 % pétrole ;
- 70 % gaz.

D. Transports

La modélisation des transports se base sur différentes hypothèses :

- Le type de camion (charge maximale et émissions)
- Les distances parcourues
- Les quantités transportées par les camions
- Le taux de retour à vide

Les hypothèses utilisées pour les transports modélisés sont les suivantes (données RDC-Environnement) :

Trajets	Centre de tri- recycleur	Recycleur - fabrication de produits recyclés	Fabricant matière vierge - fabrication de produits vierges
Distance de transport	400 km N(200-600) km ³⁵	150 km N(100-200) km	150 km N(100-200) km
Remplissage des camions	15,5 t	19,2 t	19,2 t
Taux de retour à vide ³⁶	21 %	21 %	21 %
Type de camion	32 t (charge max = 24 t)	32 t (charge max = 24 t)	32 t (charge max = 24 t)

Tableau 73 : Modélisation des transports pour les flux PET, PEHD, PEBD

³⁵ L'indication N (X1,X2) signifie que la modélisation prend en compte une distribution normale dont 99 % des valeurs sont entre les valeurs X1 et X2.

³⁶ Source : ADEME. Le taux de retour à vide est la distance qu'effectue le camion à vide (c'est-à-dire sans chargement, pour aller chercher le chargement suivant ou rentrer au dépôt), exprimée en pourcentage de la distance du trajet aller.

Trajets	Centre de regroupement - recycleur	Recycleur - fabrication de produits recyclés	Fabricant matière vierge - fabrication de produits vierges
Distance de transport ³⁷	400 km N(200-600) km ³⁸	650 km N(200-1100) km	650 km N(200-1100) km
Remplissage des camions	12-19.2 t	19,2 t	19,2 t
Taux de retour à vide ³⁹	21 %	21 %	21 %
Type de camion	32 t (charge max = 24 t)	32 t (charge max = 24 t)	32 t (charge max = 24 t)

Tableau 74 : Modélisation des transports pour le flux PVC

Trajets	Centre de tri - recycleur	Recycleur - fabrication de produits recyclés	Fabricant matière vierge - fabrication de produits vierges
Distance de transport ⁴⁰	400 km N(200-600) km ⁴¹	650 km N(200-1100) km	650 km N(200-1100) km
Remplissage des camions	15.5 t	19,2 t	19,2 t
Taux de retour à vide ⁴²	21 %	21 %	21 %
Type de camion	32 t (charge max = 24 t)	32 t (charge max = 24 t)	32 t (charge max = 24 t)

Tableau 75 : Modélisation des transports pour les flux PS et ABS

Notes :

(1) Le taux de retour à vide considéré est celui retenu comme moyenne nationale en France (21 %). Cependant, en prenant l'hypothèse maximaliste d'un taux de retour à vide de 100 % les résultats montrent toujours que les phases transports ont des contributions négligeables. Dès lors, il n'est pas nécessaire d'affiner les données et nous avons donc maintenu une hypothèse conservatrice d'un taux de retour à vide moyen de 21 %.

(2) Pour les distances de transport, le choix de fonctionner sur une gamme de valeurs (plutôt que sur une valeur fixe) est le reflet tant des incertitudes sur les valeurs, que de la volonté de présenter les différents cas de figure possibles.

³⁷ Source : recycleurs de PVC pour l'application fenêtre pour les distances de transport

³⁸ L'indication N (X1,X2) signifie que la modélisation prend en compte une distribution normale dont 99 % des valeurs sont entre les valeurs X1 et X2.

³⁹ Source : ADEME. Le taux de retour à vide est la distance qu'effectue le camion à vide (c'est-à-dire sans chargement, pour aller chercher le chargement suivant ou rentrer au dépôt), exprimée en pourcentage de la distance du trajet aller.

⁴⁰ Source : recycleurs de PVC pour l'application fenêtre pour les distances de transport

⁴¹ L'indication N (X1,X2) signifie que la modélisation prend en compte une distribution normale dont 99 % des valeurs sont entre les valeurs X1 et X2.

⁴² Source : ADEME. Le taux de retour à vide est la distance qu'effectue le camion à vide (c'est-à-dire sans chargement, pour aller chercher le chargement suivant ou rentrer au dépôt), exprimée en pourcentage de la distance du trajet aller.

(3) Le remplissage des camions dépend évidemment du plastique transporté, en fonction de sa densité. Cependant, comme les phases transports ont des contributions négligeables, il ne nous est pas apparu nécessaire d'affiner les données.

(4) Les hypothèses en matière de distance de transport diffèrent pour les distances entre les producteurs et les fabricants d'application, qui semblent moins nombreux que pour les autres plastiques.

V.1.3.3 Variantes de modélisation

Les variantes de modélisation sont étudiées en analyse de sensibilité. Trois types de variantes sont considérés.

A. Modélisation "basée sur le marché" vs. modélisation moyenne

Le scénario de base utilise des mix électriques consécutifs (européen pour le recyclage et la production de matière et produits, et français pour la production d'électricité évitée lors de l'incinération) (voir V.1.3.2A et V.1.3.2B).

La variante utilise des mix électriques moyens hors productions fatales (hydraulique).

Pour rappel, les valeurs de ces mix moyens français et européen sont présentées ci-dessous.

Nucléaire	Charbon	Gaz	Fuel	Hydraulique	Eolien	Autres SER
78.1%	4.9%	3.2%	1.8%	0%	0.4%	0.6%

Tableau 76 : Mix électrique moyen français

Nucléaire	Charbon	Gaz	Fuel	Hydraulique	Eolien	Autres SER
32.3%	30.1 %	20.9 %	3.8 %	0 %	0 %	0 %

Tableau 77 : Mix électrique moyen européen Valeur du facteur de monétarisation

Les résultats sont présentés sous forme monétarisée, soit le coût environnemental total et le coût environnemental externe.

Comme expliqué précédemment (voir III.3.2), les facteurs de monétarisation ne font pas tous l'objet d'un consensus. Dès lors, afin d'évaluer la robustesse des conclusions basées sur les résultats monétarisés, nous faisons varier les facteurs de monétarisation qui sont les plus grandes sources d'incertitude.

B. Variantes liées à la valeur des facteurs de monétarisation « effet de serre » et « consommation de ressources »

La catégorie d'impact la plus contributive est la consommation de ressources naturelles.

Au sein de cette catégorie, la part qui est la plus fortement contributive est la consommation de ressources fossiles qui représente dans la plupart des cas près de 99 % de cette catégorie d'impact.

Nous considérerons donc un cas de base et deux variantes (+ou - 20 % de la valeur du facteur de monétarisation) :

- Base : Valeur du facteur de monétarisation de 0,015 € / MJ primaire
- Variante 1.1 : hypothèse valeur basse (0,012 € / MJ primaire)
- Variante 1.2 : hypothèse long terme valeur haute (0,018 € / MJ primaire).

La seconde catégorie d'impacts la plus contributive est l'"effet de serre". Nous considérons un cas de base et deux variantes :

- Base : Prix actuel de la tonne de CO₂ sur le marché européen d'échange de quotas de CO₂⁴³ (20 € / t CO₂)

⁴³ Ce système d'échange a été mis en place dans le cadre du Protocole de Kyoto.

- Variante 2.1 : hypothèse long terme valeur basse (50 € / t CO2)
- Variante 2.2 : hypothèse long terme valeur haute (96 € / t CO2).

C. Degré d'internalisation du coût de l'impact environnemental

Le "coût environnemental total" comptabilise tous les coûts environnementaux, tandis que le "coût externe total" ne comptabilise pas les coûts internalisés par le pollueur.

Pour la consommation des ressources fossiles, le degré d'internalisation est calculé sur base du prix de l'énergie (prix du baril de pétrole). Or, le coût de l'énergie a fort varié ces derniers mois.

Nous considérerons donc un cas de base et deux variantes :

- Base : Internalisation sur base du prix du baril de pétrole brut de 64 \$
- Variante 3.1 : Internalisation sur base du prix du baril de pétrole brut de 100 \$
- Variante 3.2 : Internalisation sur base du prix du baril de pétrole brut de 150 \$.

Pour rappel, les taux d'internalisation associés à ces différentes valeurs sont présentées au Tableau 4.

Pour le calcul du coût externe de la catégorie d'impacts "effet de serre", trois scénarios sont proposés :

- Base : les coûts liés aux émissions de CO2 sont totalement internalisés (100 %), tandis que les coûts liés aux émissions des autres gaz à effet de serre ne sont pas internalisés.
- Variante 3.1 : les coûts liés aux émissions de CO2 et aux autres gaz à effet de serre sont totalement internalisés.
- Variante 3.2 : aucune internalisation n'est effectuée (situation pessimiste, où les accords ne sont pas respectés).

V.2 Recyclage de PET provenant de bouteilles

V.2.1. Contexte actuel

La collecte sélective et le recyclage du PET d'emballages ménagers se sont développés en France depuis le lancement des collectes sélectives au milieu des années 1990.

En 2006, le gisement des bouteilles et flacons en PET représente en France 390 kilotonnes. Leur collecte sélective (définie en poids de balle) représente 217 kilotonnes, soit 55,8 %⁴⁴.

Les flux de PET sont collectés en mélange dans ces collectes sélectives multimatériaux dans lesquels le PET est mélangé notamment avec le PEHD. Ils sont ensuite triés par couleur (vert, bleu, incolore) après séparation du PEHD et des autres matériaux (cannettes). La répartition des bouteilles PET par couleur, variable selon les pays, est estimée en moyenne européenne à 40-45 % pour le PET incolore, 30-35 % pour le bleu et 20-25 % pour les autres couleurs⁴⁵.

V.2.2. Hypothèses de modélisation spécifiques

V.2.2.1 Unité fonctionnelle

L'unité fonctionnelle modélisée est le recyclage d'une tonne supplémentaire de PET d'emballage en France.

⁴⁴Source : Bilan des connaissances économiques et environnementales sur la consigne des emballages boissons et le recyclage des emballages plastiques, ADEME, 2008

⁴⁵ Source AJI-Europe.

V.2.2.2 État du marché des matières concernées

A. Introduction

La consommation annuelle totale de PET (vierge + recyclé) en Europe est de 3 millions de tonnes (11 à 12 millions de tonnes dans le monde).

La source principale de PET recyclé est la bouteille en PET. Le gisement actuel de bouteilles usagées en PET représente 3,2 millions de tonnes par an en Europe. Le tonnage collecté sélectivement était de 0,92 million de tonnes en 2007, soit un peu moins de 30 %.

La première phase du recyclage (broyage + lavage + flottation) permet d'obtenir des paillettes (flakes) utilisables pour la plupart des applications sans contact alimentaire (rembourrage, ...).

A partir des paillettes, plusieurs procédés permettent de fabriquer des granulés aptes aux applications avec contact alimentaire (barquettes alimentaires, bouteilles, voire cerclage⁴⁶) : extrusion/réaction à 200°C.

Ensuite, une étape supplémentaire de polycondensation en phase solide (ou recristallisation) permet d'obtenir des granules de qualité supérieure. Ces granulés sont d'une grande pureté et ses qualités sont quasiment identiques à celles de la matière vierge.

Différents débouchés existent pour le PET recyclé :

- Les fibres

Ce débouché constitue le débouché historique des bouteilles usagées en PET. Les applications sont diversifiées : fibres de rembourrage, textiles (les fibres les plus fines sont tissées en vêtements polaires), accessoires (PET encollé au filage ou au non-tissé), tapis... Les fibres de rembourrage en particulier constituent le plus gros marché. Cette application utilise des paillettes.

- Le cerclage plastique (strapping)

Ce débouché est en croissance actuellement. Cette application utilise généralement des granules, voire des granules de qualité supérieure.

- Les feuilles de PET

- les feuilles épaisses : préformes de bacs plastiques (ex : bacs à fruits, boîtes d'œufs)
- les feuilles fines (300-500 microns) pour thermoformage

Le marché des feuilles fines constitue un débouché en développement.

- Les bouteilles en PET

Le marché des bouteilles en PET recyclé devrait se développer suite à une clarification réglementaire (directive 282-2008/EC) qui a, au niveau européen, permis d'élargir l'utilisation de PET recyclé dans les usages alimentaires. L'usage du PET recyclé était jusqu'alors limité à des applications de flaconnage de produits non alimentaires. En France notamment, certains conditionneurs d'eau minérale ont fait connaître leur intention d'introduire 25 % de PET recyclé dans leurs bouteilles. Le recyclage en boucle fermée devrait donc se développer également. Ce marché impose le respect de conditions très strictes sur l'origine et la qualité du gisement de PET.

⁴⁶ dit aussi "Strapping"

Le tableau ci-dessous récapitule la demande en PET recyclé dans les différentes applications décrites :

Produits		Fibre de rembourrage	Bouteilles à usage alimentaire	Flacons à usage non alimentaire, strapping,..	Feuilles pour thermoformage	Divers (arrosoirs, poubelles,..)	Produits moulés (pots, plateaux, automobile, EEE)	
Principaux déchets utilisés		Bouteilles PET Gisement européen : 3 200 ktonnes Gisement collecté sélectivement : 916 ktonnes						
Type de boucle		Ouverte	Fermée	Ouverte	Ouverte	Ouverte	Ouverte	
Part (%) du recyclé dans les produits	Actuelle	Jusqu'à 100%	Monocouche: 25% Multicouches: 40%	25 à 40%	80 à 90%	100%	non précisé	
	Max théorique	100%	70%, voire 100%	non précisé	100% (procédé SSP)	100%	non précisé	
Demande totale actuelle de produits	Vierge	100 kt	1700 kt	non précisé	non précisé	non précisé	non précisé	
	Recyclé	500 kt	70 kt	140 kt	120 kt	Faible	25 kt	
Evolution probable de la demande de produits	Vierge	Stagnation	Forte croissance					
	Recyclé	En diminution du fait de concurrence des autres applications	Forte croissance. La part du PET recyclé dans les bouteilles (alim. + non alim.) recyclées pourrait atteindre 8 à 10% rapidement		Forte croissance	Produits à faible valeur ajoutée - croissance faible tant que les prix du PET R sont élevés	Le marché est en croissance car il s'agit de produits à forte valeur ajoutée.	

Tableau 78 : Offre et demande de PET recyclé pour les différentes applications

B. Situation actuelle

Le tableau indique que les plus gros tonnages actuels de PET recyclé sont absorbés par les applications des fibres de rembourrage. Le marché du PET recyclé pour cette application représente 500 à 600 kt. Les autres applications qui utilisent le PET recyclé en quantité non négligeable sont le strapping et les feuilles de PET (pour bouteilles à usage non alimentaire et pour cagettes).

C. Situation prospective

Bien que l'offre de PET recyclé continue d'augmenter significativement suite au développement des collectes sélectives, la demande du marché en PET recyclé reste supérieure à l'offre. La tension est même de plus en plus forte dans les pays industrialisés. Il n'y a donc pas d'excédent d'offre sur le marché et il est peu probable que la situation se retourne à moyen terme car un nombre croissant d'applications se développe.

Dès lors, on peut considérer que tout apport d'une tonne supplémentaire de PET recyclé trouvera des débouchés dans des applications à haute valeur ajoutée comme les bouteilles.

Note : La situation du marché est évaluée sur le long terme, de façon structurelle. Il se peut que la situation passe par de courtes périodes où la situation s'inverse (fermeture des frontières chinoises...). S'il y a une baisse brusque et durable de

la demande extra-européenne dans la fibre, il faudrait de l'ordre de 6 mois au marché pour rétablir un excès de demande (investissements des recycleurs et des incorporateurs). **La localisation en Europe des activités de recyclage et l'incorporation de PET recyclé dans les bouteilles sont des facteurs stabilisateurs du marché.**

Modélisation :

→ Il y aura toujours une demande forte pour le PET recyclé. L'élément limitant le recyclage est donc l'offre en PET recyclé et non pas la possibilité de l'intégrer dans des produits neufs. **Les bénéfices du recyclage sont donc alloués à 100 % au système amont (qui fournit le PET recyclé).**

Au plan européen, si le prix du PET recyclé a été tiré vers le haut du fait de la demande des pays d'Asie pour le rembourrage, la tension sur le prix du PET vierge est également importante du fait d'une offre insuffisante en PET vierge. Dans un tel contexte, le PET recyclé sera probablement préférentiellement utilisé pour remplacer du PET vierge (si la qualité du recyclé le permet, voir section V.2.2.3). Pour la modélisation, nous optons donc pour une application remplaçant du PET vierge.

L'approche prospective indique en outre que la part du recyclage en fibres textiles tend à diminuer au profit d'autres applications (recyclage botte-to-bottle, strapping, feuilles de PET...).

Les différentes applications pour le PET recyclé, ainsi que les matières auxquelles se substitue le PET recyclé pour chacune de ces applications sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Applications possibles	Matériaux en concurrence avec la résine recyclée
Fibre de rembourrage	Coton et PET vierge
Bouteilles à usage alimentaire *	PET vierge
Flacons à usage non alimentaire, strapping,...	PET vierge, PP
Feuilles pour thermoformage	PET vierge, PS, PVC, PVC/PE
Divers (arrosoirs, poubelles,..)	LDPE, HDPE
Produits moulés (pots, plateaux, automobile, EEE)	ABS, PET vierge

Tableau 79 : Applications du PET recyclé et matériaux remplacés

Sur base des éléments présentés ci-dessus, une application est sélectionnée pour la modélisation du recyclage du PET.

Modélisation :

→ Filière sélectionnée : Le PET recyclé sera utilisé dans la production de bouteille en PET à usage alimentaire⁴⁷ ; le **PET recyclé remplace du PET vierge.**

V.2.2.3 Données techniques utilisées

A. Qualité du PET recyclé

La qualité du PET recyclé est définie par son taux d'impuretés et sa résistance mécanique.

Le taux d'impuretés toléré dans les paillettes est de 20 à 100 ppm selon les applications.

Le procédé de polycondensation permet d'atteindre une pureté et des propriétés mécaniques équivalentes au PET vierge. Mais le risque de défaut restera toujours plus élevé pour du PET recyclé que pour du vierge. Ce procédé est utilisé pour la production de PET-R à destination des applications bouteilles.

⁴⁷ Nous retenons donc pour la modélisation le recyclage du PET clair. En effet, dans les centres de tri, le PET est généralement trié par couleur (PET clair – contenant les bouteilles transparentes et bleues et PET coloré) et c'est le PET clair qui est recyclé dans les bouteilles.

Modélisation :

→ Le taux de substitution est considéré comme égal à 1 pour la bouteille du fait de la qualité du PET recyclé qui est équivalente à celle du PET vierge. Cependant, on analyse la sensibilité des résultats à une variation de la valeur du taux de substitution entre **0,9 et 1 (cas d'autres applications)**.

B. Procédés de recyclage

Pour la filière bottle-to-bottle, on considère un procédé de recyclage qui va jusqu'à la recondensation du PET recyclé. Ce recyclage s'effectue en 3 étapes :

B.1 La fabrication de paillettes (flakes)

C'est le résultat du broyage des bouteilles en PET (procédé mécanique uniquement).



Figure 68 : Flakes de PET

La chaîne de recyclage aboutissant à la production de paillettes est relativement simple; elle comporte les étapes suivantes :

- Broyage, concassage
- Flottation
- Lavage, séchage

B.2 Les granules

Pour produire des granules, on ajoute une extrudeuse à une chaîne produisant les paillettes.



Figure 69 : Granules de PET

Les paillettes produites sont stockées dans des silos qui assurent ensuite l'approvisionnement de l'extrudeuse, comme le montre la figure ci-dessous.

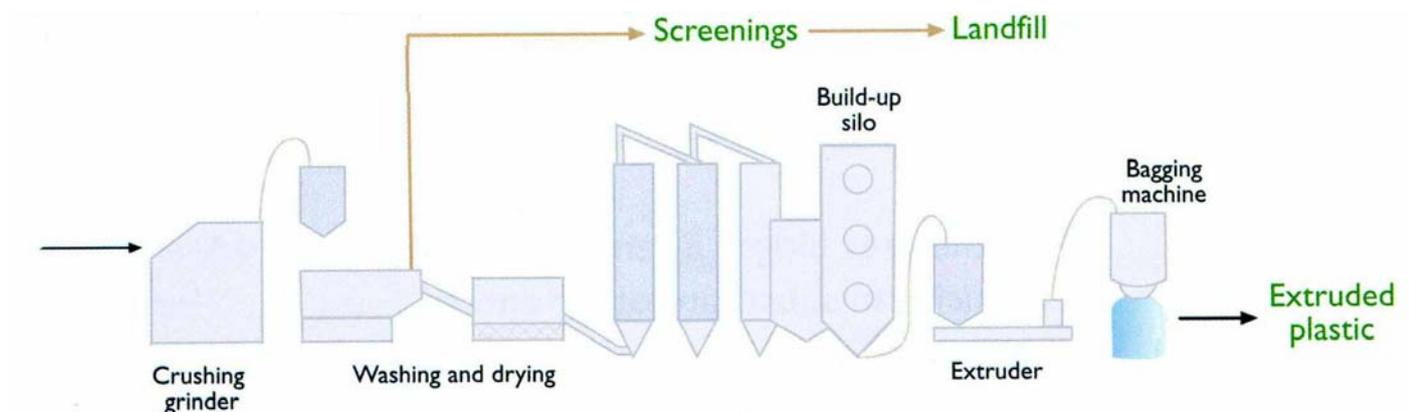


Figure 70 : Etapes du recyclage en granules

Pour extruder le PET, on alimente en paillettes un fourreau cylindrique thermorégulé à l'intérieur duquel tourne une vis sans fin : l'extrudeuse (voir Figure 71). Cette vis malaxe et transporte les paillettes qui fondent sous l'effet de la chaleur et des frottements, permettant d'obtenir un mélange homogène similaire à une pâte. Le PET fondu est injecté dans une buse, puis coupé en granules lorsqu'il a refroidi.

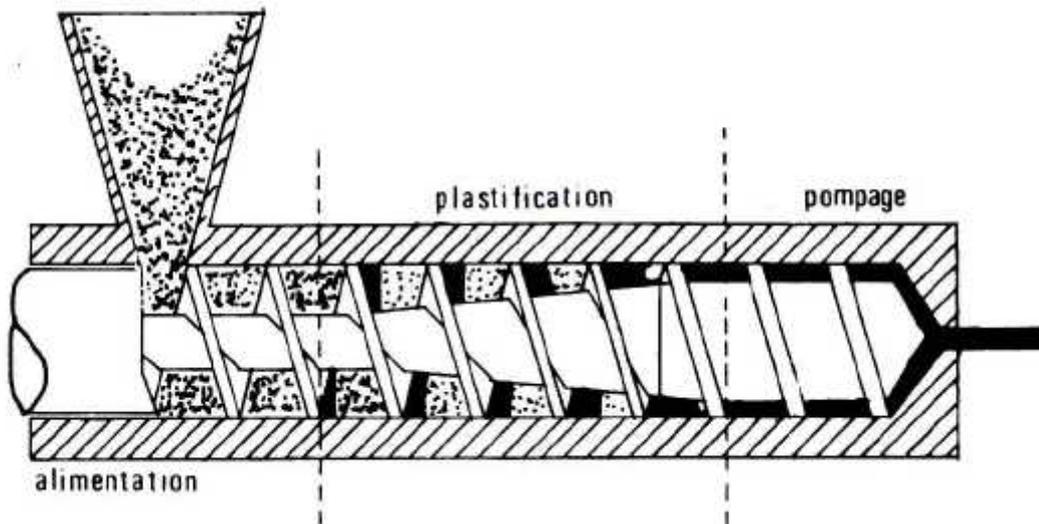


Figure 71 : Schéma de principe d'une extrudeuse

B.3 Granules condensés cristallisés

Après l'étape d'extrusion, les granules passent dans un cristalliseur où ils sont chauffés à 200°C (leur température de fusion est de 270°C). Le PET cristallisé est ensuite envoyé dans un réacteur colonne de post-condensation, où il reste 10 à 15 h. Ce réacteur permet d'éliminer l'eau ainsi que les impuretés.

Les granules cristallisés présentent une meilleure viscosité et un taux d'impureté très faible qui leur permettent d'être utilisés pour des applications alimentaires, telles que la fabrication de bouteilles (« bottle-to-bottle »).

Modélisation :

→ Le rendement d'une chaîne de recyclage en granules cristallisés est de 92 % en moyenne. **Dans la modélisation, nous prendrons une distribution normale de valeurs comprises entre de 89 % et 95 %⁴⁸.**

Le recyclage en granules cristallisés implique les consommations reprises dans le tableau ci-dessous.

	Électricité	Chaleur (gaz)	Chaleur (fuel)	Eau	Détergent
Étape flakes	250 kWh	670 kWh soit 2412 MJ		3 500 L	20 kg
Étape granules	280 kWh	20 kWh soit 72 MJ		-	-
Étape condensation / cristallisation	100 kWh	50 kWh soit 180 MJ	50 kWh soit 180 MJ	-	-
Total	630 kWh	740 kWh	50 kWh	3 500 L	20 kg

Tableau 80 : Consommations du recyclage du PET en granulés recristallisés (par tonne entrante)⁴⁹

⁴⁸ Source : d'après des visites de différents recycleurs en Europe, 2008, RDC Environnement.

⁴⁹ Source : d'après des visites de différents recycleurs en Europe, 2008, RDC Environnement.

Modélisation :

→ Compte tenu de l'incertitude des valeurs de consommations énergétiques des procédés de recyclage dans la modélisation, nous prendrons une distribution uniforme de valeurs autour des données moyennes pour les consommations d'énergie, d'eau et de détergent (entre -10 % et +10 %).

C. Production de la résine PET vierge

Nous utilisons les données issues de la base de données EcoInvent⁵⁰ (voir Tableau 72).

D. Production des produits finis : bouteille en PET (vierge et recyclé)

Pour l'étape d'injection-soufflage des bouteilles, la consommation d'électricité pour l'injection soufflage considérée est de **1,803 kWh /kg (source : données PlasticsEurope)**.

Modélisation :

→ Compte-tenu de l'incertitude des valeurs de consommations fournies par différentes sources, nous avons modélisé la consommation d'électricité pour l'injection-soufflage avec une distribution uniforme de 1,63 à 1,90 kWh/kg.

V.2.3. Résultats

Le modèle correspondant à la décision de recycler une tonne supplémentaire de PET se décompose en plusieurs étapes ou phases.

Elles correspondent soit à des effets engendrés par la décision (et comptabilisées positivement) soit à des effets évités par la décision. Elles sont décrites dans le tableau ci-dessous :

Phases	Etapes considérées
Recyclage du PET	Recyclage – matériau (PET recyclé en granules polycondensés)
	Recyclage – application (Fabrication de la bouteille en PET recyclé)
	Recyclage – Transport (transport centre de tri- recycleur et recycleur –application)
Production évitée	Production évitée – matériau (Fabrication de granules de PET vierge)
	Production évitée – application (Fabrication de bouteilles en PET vierge)
	Production évitée – transport (transport producteur – application) ⁵¹
Fin de vie évitée	Élimination en CSDU et/ou incinérateur évitée grâce au recyclage

Tableau 81 : Recyclage du PET – Description des phases

Rappel :

Les impacts environnementaux du recyclage sont monétarisés et sont présentés sous forme de "coût environnemental total" et de "coût externe total".

Ces coûts sont exprimés en € 2007 par unité fonctionnelle (1 tonne de PET recyclé)

Une valeur positive indique un coût pour la société et une valeur négative indique un bénéfice pour la société.

⁵⁰ PET « bottle grade » (N°1828 EcoInvent, V2 2007)

⁵¹ Le transport concernant la production de matière vierge est intégré dans la phase production évitée -matériau, mais aucune valeur n'est fournie dans le LCI.

V.2.3.1 Scénario de base

Le scénario de base retient les hypothèses suivantes :

- Approche conséquentielle pour la production d'électricité
- Facteur de monétarisation de la consommation de ressource : 0,015 € / MJ primaire
- Facteur de monétarisation des gaz à effet de serre : prix actuel de la tonne de CO2 sur le marché européen d'échange de quotas de CO2 (20 € / t CO2)
- Calcul du coût externe : Taux d'internalisation des coûts de la ressource de 53 % (correspond à un prix e 64 \$ le baril)
- Calcul du coût externe : Taux d'internalisation des coûts des émissions de gaz à effet de serre de 100 % pour le CO2 et 0 % pour les autres gaz à effet de serre.

A. Bilan par phase

- Coût environnemental total

Le coût présente une valeur négative, il s'agit donc d'un bénéfice. Ce bénéfice environnemental total moyen est de 1 028 € / t PET recyclé.

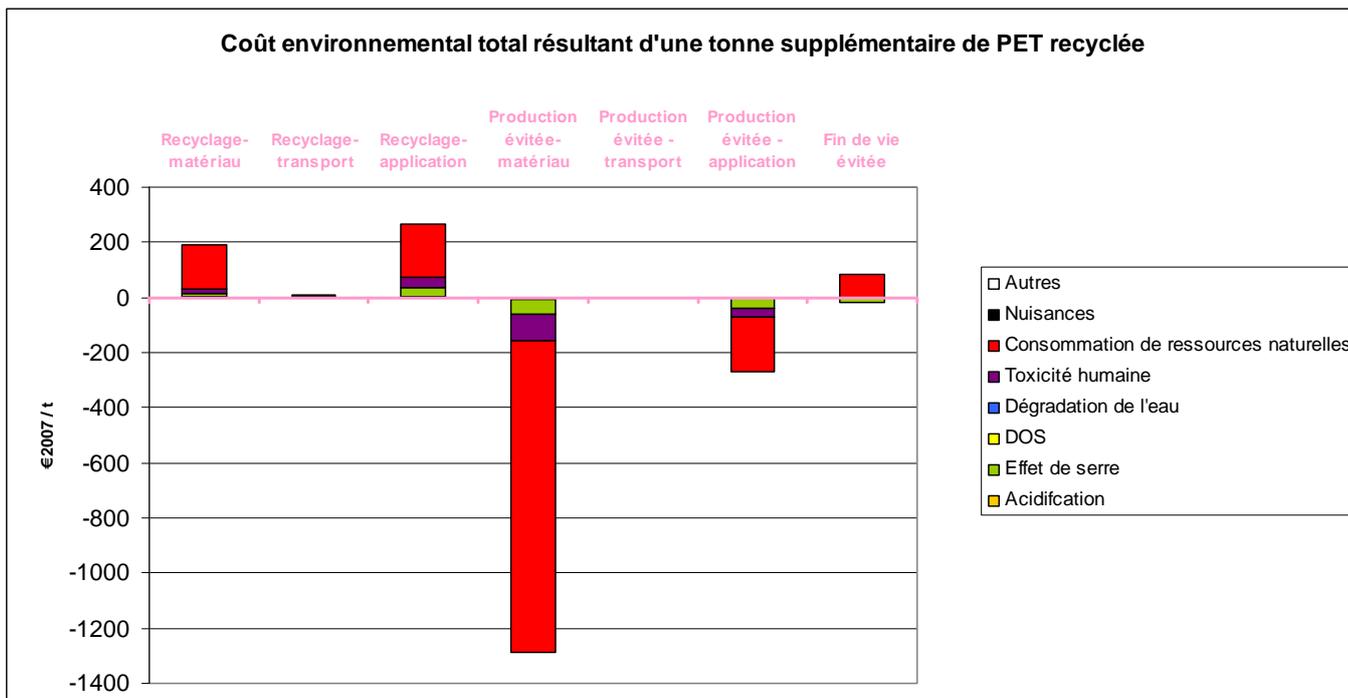


Figure 72 : Recyclage du PET – Résultats par phase – Coût environnemental total

Phases	Acidification	Effet de serre	DOS	Dégradation de l'eau	Toxicité humaine	Consommation de ressources naturelles	Nuisances	Autres	Coût environnemental total
Recyclage-matériau	1	12	0	0	16	162	0	0	191
Recyclage- transport	0	1	0	0	1	6	0	0	7
Recyclage-application	2	35	0	1	34	195	0	0	267
Production évitée-matériau	-6	-56	0	-1	-92	-1135	0	-1	-1290
Production évitée - transport	0	0	0	0	0	-1	0	0	-2
Production évitée - application	-2	-35	0	-1	-34	-195	0	0	-267
Fin de vie évitée	0	-19	0	-1	0	84	0	0	65
Total	-5	-62	0	-1	-75	-885	0	-1	-1028

Phases	Acidification	Effet de serre	DOS	Dégradation de l'eau	Toxicité humaine	Consommation de ressources naturelles	Nuisances	Autres	Coût environnemental total
Recyclage-matériau	0%	1%	0%	0%	2%	16%	0%	0%	19%
Recyclage- transport	0%	0%	0%	0%	0%	1%	0%	0%	1%
Recyclage-application	0%	3%	0%	0%	3%	19%	0%	0%	26%
Production évitée-matériau	1%	5%	0%	0%	9%	110%	0%	0%	125%
Production évitée - transport	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Production évitée - application	0%	3%	0%	0%	3%	19%	0%	0%	26%
Fin de vie évitée	0%	2%	0%	0%	0%	8%	0%	0%	6%
Total	0%	6%	0%	0%	7%	86%	0%	0%	100%

Légende

	> 50 %
	20-50 %
	10-20 %
	6-10 %
	3-5%
	< 3 %

Tableau 82 : Résultats chiffrés (en valeur absolue)- Recyclage du PET – Coût environnemental total⁵²

⁵² Les pourcentages sont calculés par rapport au coût total, en valeur absolue. Dès lors, les contributions relatives peuvent être supérieures à 100%.

Le graphique et les tableaux ci-dessus montrent que les phases qui ont un impact défavorable sur l'environnement sont, par ordre d'importance :

- la fabrication de l'application qui utilise la matière recyclée, à savoir la bouteille en PET recyclée (26 %) ;
- le recyclage du PET en granules (19 %) ;
- la fin de vie évitée : en effet, en recyclant, on évite une part d'incinération qui elle-même permettait d'éviter la production de chaleur et la production d'électricité (6 %).

A l'inverse, les phases qui génèrent des bénéfices sont les phases suivantes :

- Production évitée de granules de PET vierge (125 %),
- Fabrication évitée de la bouteille à partir de granules vierge (26 %).

Les transports pèsent seulement pour 1 % des impacts environnementaux.

La phase de fabrication de la bouteille à partir de PET recyclé est égale à la phase de fabrication à partir de PET vierge. Ceci est lié au fait que le taux de substitution est égal à 1. Si ce taux était inférieur à 1, la phase de fabrication de la bouteille à partir de PET recyclé serait légèrement plus impactante que la phase de fabrication à partir de PET vierge. En effet, la consommation énergétique pour la production d'une bouteille en PET étant globalement proportionnelle à la quantité de matière utilisée, s'il faut plus de matière pour la produire à partir de granules recyclés, il faudra également plus d'énergie.

Les bénéfices étant plus importants que les coûts (2,5 fois plus importants), le recyclage du PET présente un bilan global favorable pour l'environnement.

Concernant les différentes catégories d'impacts, les économies de production de matière vierge impactent favorablement les catégories d'impact "consommation de ressources fossiles" (contribution de 110 %) et "toxicité humaine" (9 %) et "effet de serre" (5 %).

La toxicité humaine représente une part importante du fait des émissions liées à la fabrication du PET vierge (22 % de cette catégorie d'impact est due aux particules, 31 % aux NOx et 32 % aux SOx).

- Coût externe total

Le bénéfice externe moyen est de 503 € / tonne de PET recyclé.

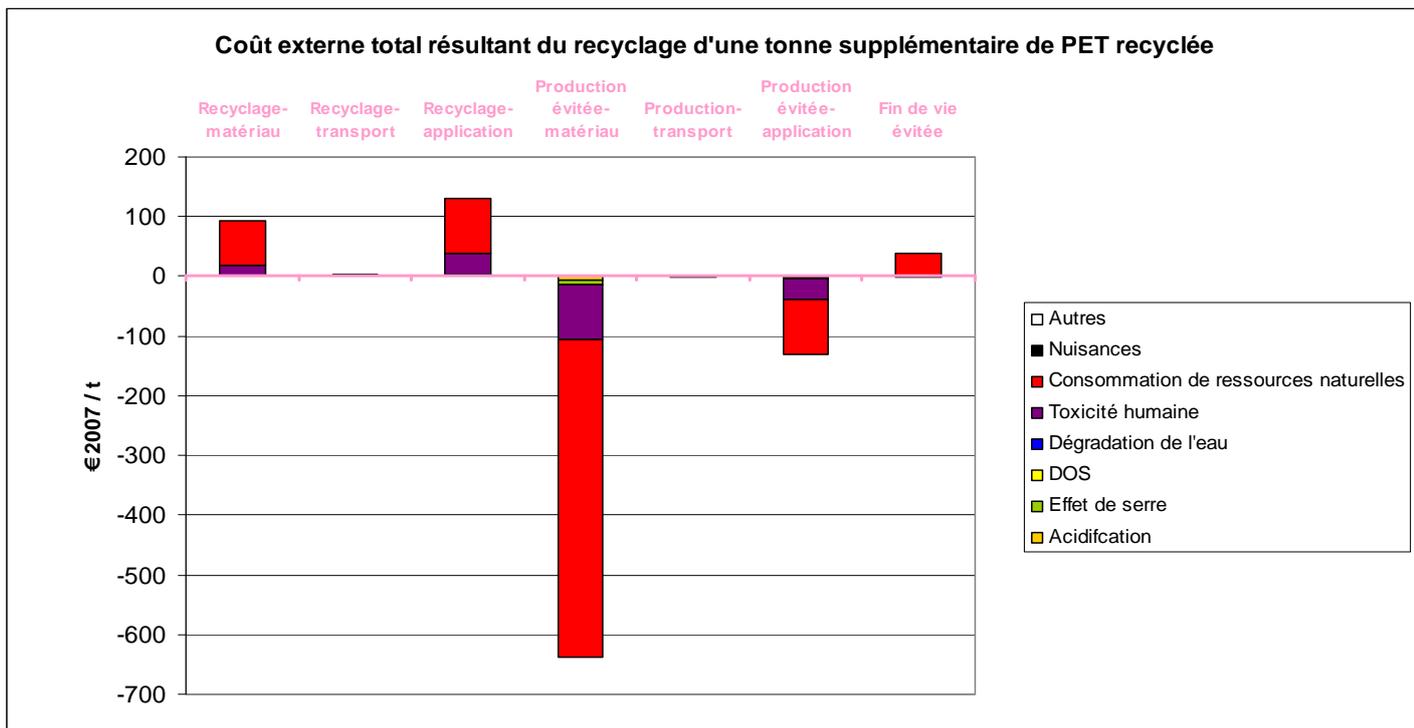


Figure 73 : Recyclage du PET – Résultats par phase – Coût externe total

Phases	Acidification	Effet de serre	DOS	Dégradation de l'eau	Toxicité humaine	Consommation de ressources naturelles	Nuisances	Autres	Coût environnemental total
Recyclage-matériau	1	1	0	0	16	76	0	0	94
Recyclage-transport	0	0	0	0	1	3	0	0	4
Recyclage-application	2	2	0	0	34	92	0	0	130
Production évitée-matériau	-6	-6	0	0	-92	-533	0	-1	-639
Production-transport	0	0	0	0	0	-1	0	0	-1
Production évitée-application	-2	-2	0	0	-34	-92	0	0	-130
Fin de vie évitée	0	0	0	0	0	39	0	0	39
Total	-5	-6	0	0	-75	-416	0	-1	-503

Phases	Acidification	Effet de serre	DOS	Dégradation de l'eau	Toxicité humaine	Consommation de ressources naturelles	Nuisances	Autres	Coût externe total
Recyclage-matériau	0%	0%	0%	0%	3%	15%	0%	0%	19%
Recyclage-transport	0%	0%	0%	0%	0%	1%	0%	0%	1%
Recyclage-application	0%	0%	0%	0%	7%	18%	0%	0%	26%
Production évitée-matériau	1%	1%	0%	0%	18%	106%	0%	0%	127%
Production-transport	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Production évitée-application	0%	0%	0%	0%	7%	18%	0%	0%	26%
Fin de vie évitée	0%	0%	0%	0%	0%	8%	0%	0%	8%
Total	1%	1%	0%	0%	15%	83%	0%	0%	100%

Légende

	> 50 %
	20-50 %
	10-20 %
	6-10 %
	3-5%
	< 3 %

⁵³ Les pourcentages sont calculés par rapport au coût total, en valeur absolue. Dès lors, les contributions relatives peuvent être supérieures à 100%.

On constate que la catégorie d'impact effet de serre devient négligeable.

En effet, dans les coûts environnementaux totaux, les flux élémentaires qui constituent la catégorie « coût environnemental total - effet de serre » sont composés à 90 % de CO₂. Dès lors que le coût CO₂ est internalisé, le coût externe correspondant représente donc 10 % du coût environnemental total de l'effet de serre.

En revanche en valeur absolue, les valeurs sont quasiment divisées par 2 par rapport aux coûts environnementaux totaux. Ceci est dû à l'internalisation de coûts importants, soit le coût du CO₂ fossile (internalisation totale) et, surtout, celui de l'énergie (internalisation partielle – voir II.2.5).

Les économies de matière vierge impactent favorablement le bilan environnemental au travers des catégories d'impact des consommations de ressources fossiles (106 %) et dans une moindre mesure de la toxicité humaine (18 %). La part de la toxicité humaine devient plus importante, car aucun coût lié à cet impact n'est internalisé.

B. Analyse de sensibilité

Le tableau ci-dessous indique l'influence d'une variation réaliste des paramètres du modèle sur les résultats :

Paramètre	Intervalle de valeurs	Influence
Taux de substitution	0.9-1	Forte
Efficacité de recyclage (rendement)	89-95 %	Moyenne
Consommation d'électricité pour le recyclage du PET	630 kWh / t +/-10%	Faible
Distance entre le centre de tri et le recycleur	200-600 km	Très faible
Distance entre le recycleur et le fabricant de bouteille	100-200 km	Nulle
Consommation d'eau pour le recyclage du PET	3500 L / t +/-10%	Nulle
Consommation de détergent pour le recyclage du PET	20 kg/ t +/-10%	Nulle

Tableau 84 : Influence des paramètres

Les graphiques ci-dessous sont le résultat de 1 000 itérations de calculs combinant les différentes valeurs possibles des paramètres variables :

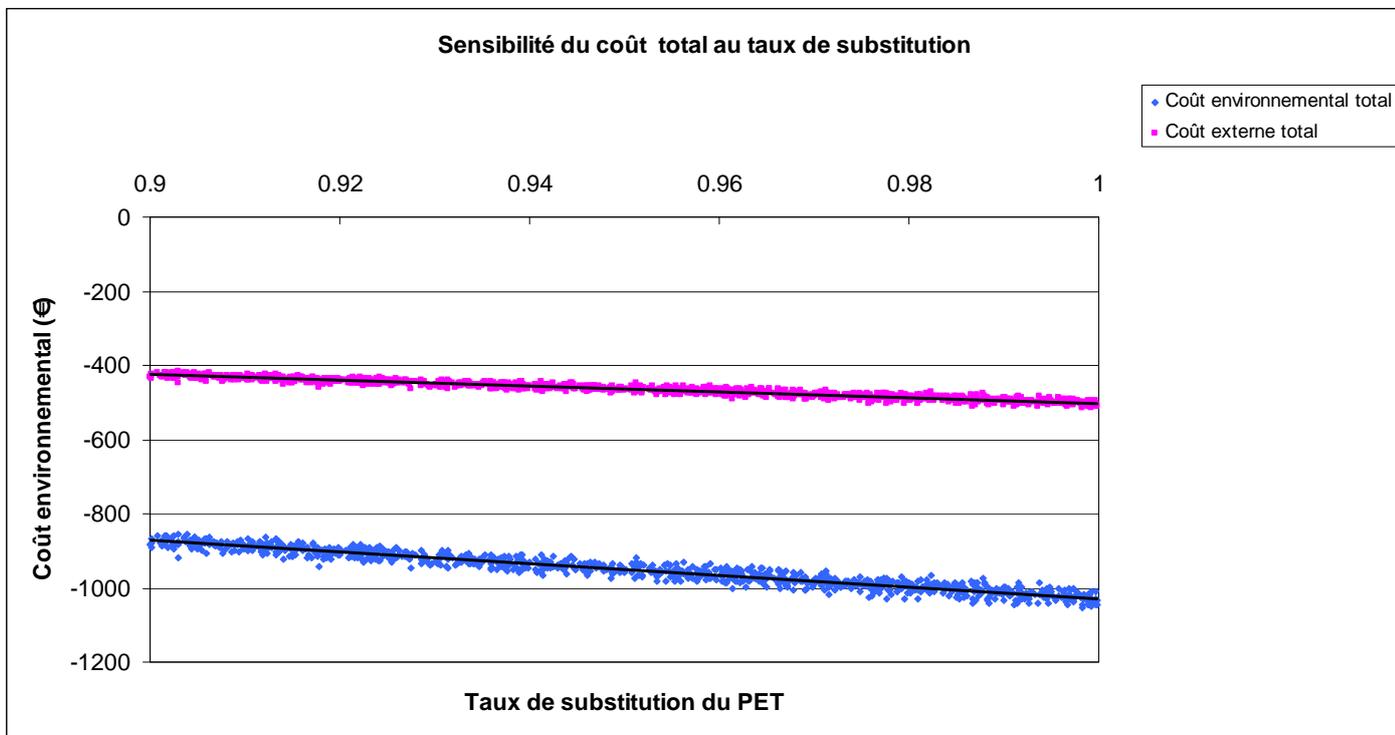


Figure 74 : Recyclage PET - Sensibilité des coûts totaux au taux de substitution

Le graphe ci-dessus indique que plus le taux de substitution est élevé, plus grand est le bénéfice environnemental. L'augmentation de 10 % du taux de substitution entraîne une augmentation du bénéfice environnemental total de 18 %.

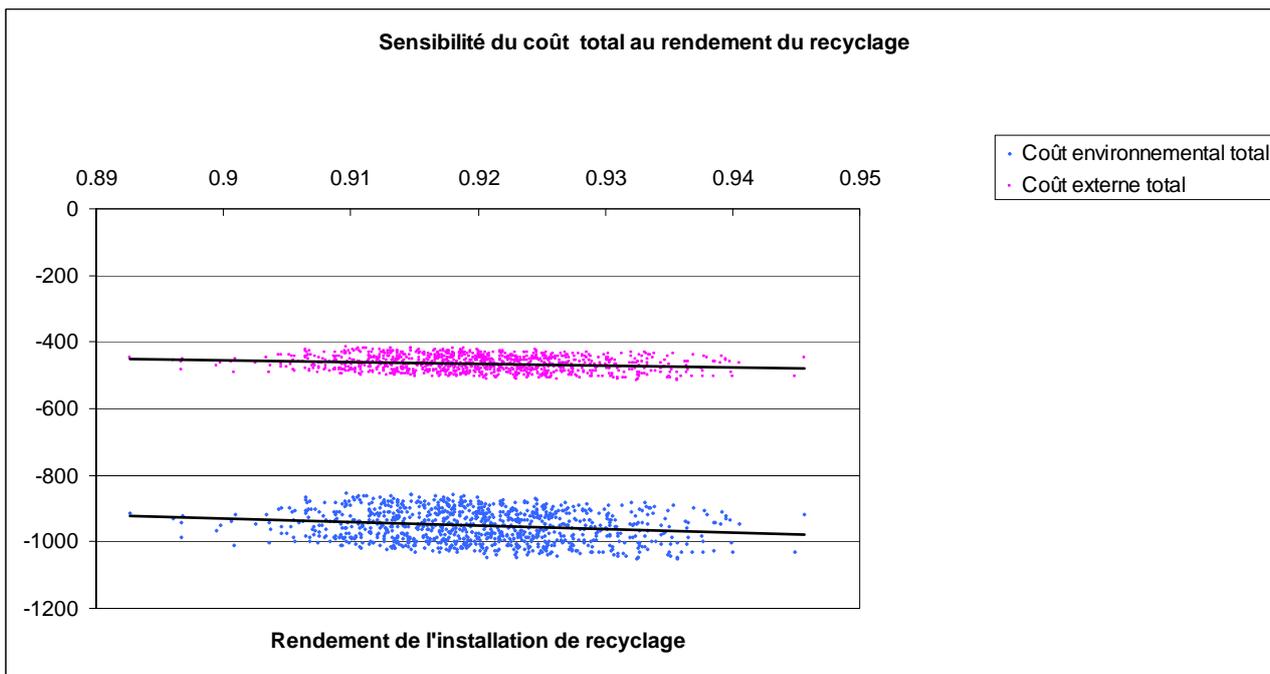


Figure 75 : Recyclage PET - Sensibilité des coûts totaux en fonction de l'efficacité de recyclage

Le graphique ci-dessus indique que meilleure est l'efficacité de recyclage, meilleurs sont les bénéfices environnementaux. Le gain d'1 % de rendement (autour de la valeur moyenne de 92 %) permet une amélioration d'environ 1 % du bénéfice environnemental.

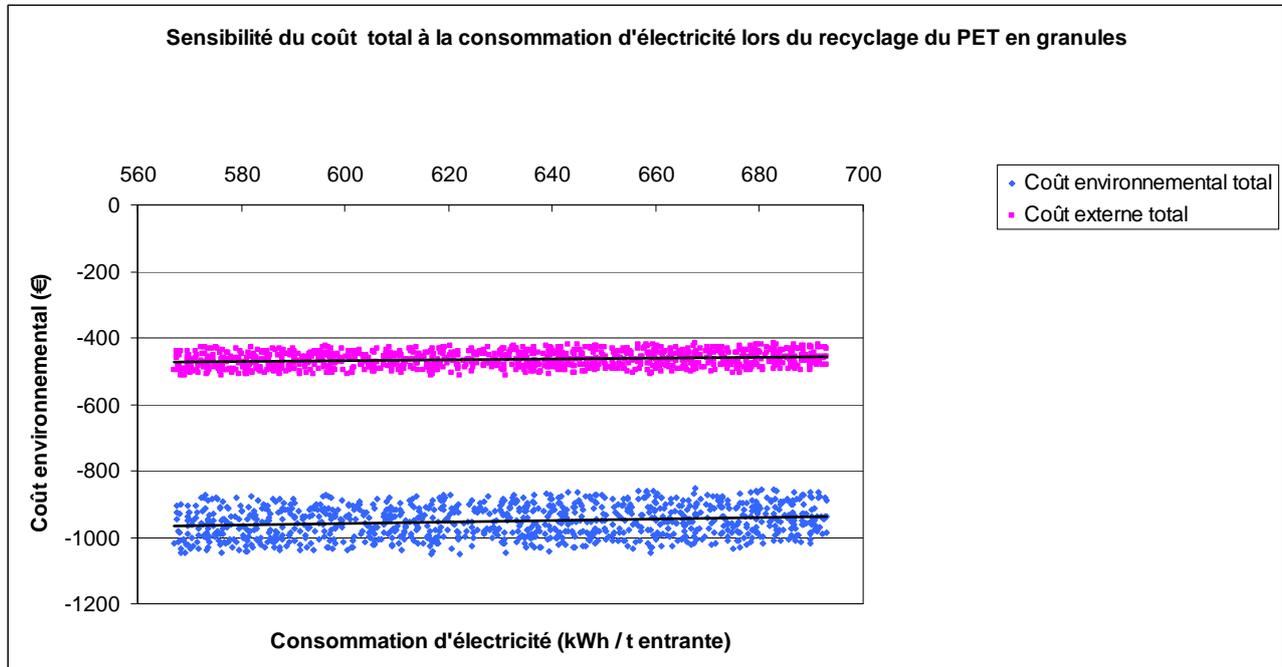


Figure 76 : Recyclage PET - Sensibilité des coûts totaux en fonction de la consommation électrique du recyclage

Le graphique ci-dessus montre qu'il n'existe pas de sensibilité significative des résultats à la consommation d'électricité du procédé de recyclage.

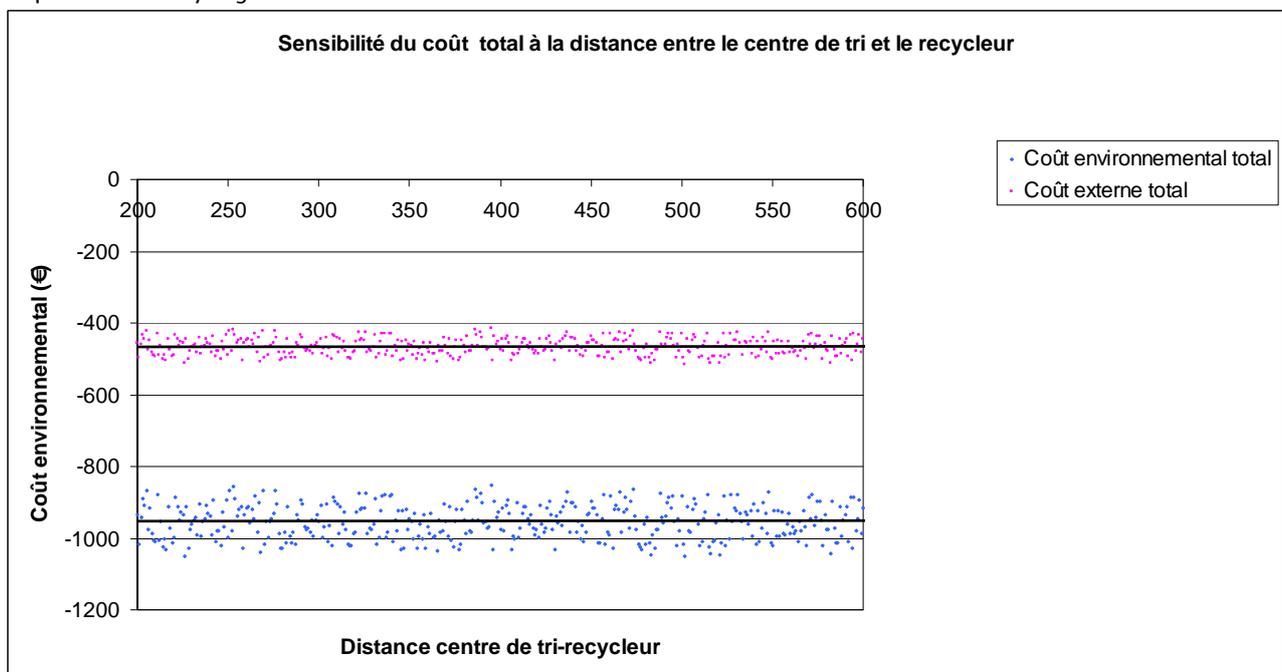


Figure 77 : Recyclage PET - Sensibilité des coûts totaux en fonction de la distance entre le centre de tri et le recycleur

Le graphique ci-dessus montre qu'il n'existe pas de sensibilité significative des résultats à la distance entre le centre de tri et le recycleur. Une conclusion similaire est tirée pour la distance entre le recycleur et l'unité de production de la bouteille.

V.2.3.2 Variantes

A. Variante liée au choix du mix électrique

Une variante est proposée : Utilisation des mix électriques moyens au lieu des mix électriques consécutifs.

Coût environnemental du recyclage d'une tonne de PET	Coût environnemental total	Coût externe
Variante mix marginal	-1028	-503
Variante mix moyen	-1029	-503

Tableau 85 : Recyclage du PET - Résultats du scénario de base et de la variante "mix moyen"

Le tableau ci-dessus montre que dans tous les cas, le recyclage du PET se traduit par un bénéfice environnemental pour la société.

Les différences de coût entre les deux scénarios sont très faibles .

Les mix électriques moyen et consécutif européens et français présentent en effet un part assez similaire d'énergie fossile : respectivement 87 % et 100 % pour les mix européens et 10 % et 0 % pour les mix français.⁵⁴

B. Variantes liées à la monétarisation de la catégorie d'impact "consommation de ressources"

Ces variantes portent sur deux paramètres :

- Scénario de base :
 - Le coût environnemental lié à la consommation d'énergie se base sur un prix de 64 \$ le baril (soit une internalisation de 53 %).
 - Le facteur de monétarisation de la consommation de ressources fossiles est de 0,015 € / MJ primaire.
- Variation sur le degré d'internalisation (ne concerne que le coût externe) :
 - Le coût environnemental lié à la consommation d'énergie se base sur un prix de 100 \$ le baril
 - Le coût environnemental lié à la consommation d'énergie se base sur un prix de 150 \$ le baril
- Variation sur le facteur de monétarisation des émissions de GES⁵⁵ :
 - Le facteur de monétarisation de la consommation de ressources fossiles est de 0,012 € / MJ primaire.
 - Le facteur de monétarisation de la consommation de ressources fossiles est de 0,018 € / MJ primaire.

⁵⁴ Voir V.1.3.2 pour la composition de ces mix

⁵⁵ Ces valeurs sont discutées plus en détails dans le Guide méthodologique 2007.

Coût environnemental du recyclage d'une tonne de PET		Coût environnemental total	Coût externe		
			Prix de 64\$ le baril	Prix de 100\$ le baril	Prix de 150\$ le baril
Valeur retenue	0,015 e/MJ	-1028	-503	-237	-87
Valeur basse	0,012 e/MJ	-851	-335	-87	-87
Valeur haute	0,018 e/MJ	-1205	-692	-427	-87

Tableau 86 : Recyclage PET- Résultats selon le prix du baril de pétrole

Le tableau ci-dessus montre que la valeur du facteur de monétarisation influence fortement le coût environnemental total : la variation du coût est directement liée à celle du facteur de monétarisation, car la catégorie « consommation de ressources » est de loin la plus contributive dans le bilan environnemental du recyclage.

De plus, la variation du prix du baril a une incidence très forte sur le coût externe total. Pour un prix du baril de 150 \$, le prix de l'énergie est totalement internalisé, et de ce fait le coût externe est très bas et ne représente plus que le coût monétarisé des autres catégories d'impact.

C. Variantes liées à la monétarisation de la catégorie d'impact "effet de serre"

Ces variantes portent sur deux paramètres :

- Scénario de base :
 - Le coût environnemental lié aux émissions de CO2 est internalisé à 100 % pour le CO2 et à 0 % pour les autres GES.
 - La tonne de CO2 vaut 20 €
- Variation sur le degré d'internalisation (ne concerne que le coût externe) :
 - 0 % du coût environnemental des émissions de GES sont internalisés
 - 100 % du coût environnemental des émissions de GES sont internalisés
- Variation sur le facteur de monétarisation des émissions de GES⁵⁶ :
 - La tonne de CO2 vaut 50 €
 - La tonne de CO2 vaut 96 €

NB. Concernant le mix électrique, le scénario de base est considéré, autrement dit les mix consécutifs.

Impact environnemental du recyclage d'une tonne de PET		Coût environnemental total	Coût externe		
			0 % internalisation pour tous les GES	100 % internalisation CO2, 0 % pour autres GES	100 % internalisation pour tous les GES
Objectif Kyoto	20 € / t CO2 eq.	-1028	-558	-503	-497
Objectif Durabilité, valeur basse	50 € / t CO2 eq.	-1121	-651	-511	-497
Objectif Durabilité, valeur haute	96 € / t CO2 eq.	-1262	-792	-525	-497

Tableau 87 : Recyclage PET - Résultats selon le degré d'internalisation des coûts des émissions de GES

⁵⁶ Ces valeurs sont discutées plus en détails dans le Guide méthodologique 2007.

Le tableau ci-dessus montre que la valeur du facteur de monétarisation des gaz à effet de serre influence fortement le coût environnemental total (variation de 20 % de la valeur du coût entre l'hypothèse de 13 € / t CO₂ et 96 € / t CO₂) et le coût environnemental externe en cas d'internalisation nulle (situation peu probable) (variation de 40 %).

Si le degré d'internalisation est fort, la valeur du facteur de monétarisation influence peu les résultats (variation maximum de 3 %).

Pour un facteur de monétarisation donné, l'internalisation des coûts de **tous** les gaz à effet de serre entraîne une diminution de la valeur du coût externe. Plus la valeur du facteur de monétarisation est élevée, plus son influence est forte, entraînant jusqu'à une différence de 54 % entre les deux scénarios extrêmes (0 % et 100 % d'internalisation) pour un facteur de 96 €/tonne CO₂.

Note : si la part des différentes catégories d'impact diffère un peu selon la valeur du facteur de monétarisation effet de serre, la catégorie consommation de ressources demeure la plus impactante.

V.3 Recyclage de PEHD provenant de flacons

V.3.1. Contexte

La collecte sélective et le recyclage du PEHD d'emballages ménagers se sont développés en France depuis le lancement des collectes sélectives au milieu des années 1990.

En 2006, le gisement des bouteilles et flacons en PEHD représente en France 110 kilotonnes. Leur collecte sélective (définie en poids de bale) représente environ 50 %.

V.3.2. Hypothèse de modélisation

V.3.2.1 Unité fonctionnelle

L'unité fonctionnelle modélisée est le recyclage d'une tonne supplémentaire de PEHD d'emballage en France jusqu'à son application finale.

V.3.2.2 État du marché des matières concernées

A. Introduction

Le gisement total de PEHD recyclable en Europe est de 3,2 millions de tonnes, dont 1,2 million de tonnes est constitué de bouteilles et flacons

Les débouchés majoritaires du PEHD recyclé sont les tuyaux pour la construction et les caisses, cageots et palettes. Globalement le marché des produits en PEHD recyclé dépend à 80 % du secteur du bâtiment. Il est donc très sensible aux fluctuations conjoncturelles du secteur.

L'origine du PEHD influence les caractéristiques du PEHD recyclé. Ainsi l'utilisation de PEHD recyclé dans les bouteilles à usage alimentaire est quasiment impossible dans de nombreux pays car les contraintes de couleur et d'odeurs limitent le marché.

Les propriétés du PEHD recyclé sont inférieures à celle du PEHD vierge. C'est pourquoi le marché est généralement limité à des produits pour lesquels la recherche de qualité n'est pas fondamentale. Ainsi par exemple, pour la production de tuyaux, les tuyaux en PEHD recyclé ne pourront pas être utilisés dans le cas de spécifications mécaniques contraignantes comme les fluides sous pression (ex : approvisionnement en eau du robinet) car leur résistance mécanique est insuffisante.

Le tableau ci-dessous présente la demande en PEHD recyclé des différentes applications décrites.

Produits		Tuyaux pour la construction, conduits de câbles	Caisses, palettes, pots	Accessoires ménagers (bacs rangement, étagères, corbeilles,...)	Bouteilles pour usages alimentaires
Principaux déchets utilisés		Fûts et bidons Bouteilles Accessoires ménagers Bouchons	Palettes Fûts Bouteilles Accessoires ménagers Bouchons	Fûts et bidons Bouteilles Bouchons	Aux USA et en Grande-Bretagne (à partir de bouteilles transparentes)
Type de boucle		Ouverte	Fermée en majorité, sauf pour les pots	Ouverte	Fermée
Part (%) du recyclé dans les produits	Actuelle	25% à 100%	Casiers : 70% Pots : 5%	25%	0 %
	Maximale théorique	100%	100%	30%	0 %
Demande totale de produits (X1000 tonnes)	Vierge	Agriculture : 110 kt Construction : 300 kt	700 kt	300 kt	300 kt
	Recyclé	25 kt de tuyaux agricoles à partir de fûts et bidons 120 kt de tuyaux pour la construction à partir de fûts et bidons	30 kt (83% des 180 kt sont recyclés en boucle fermée, dont 70 % des cageots à bouteilles)	10 kt	0 kt
Evolution probable de la demande de produits (% annuel)	Vierge	Croissant			Stable
	Recyclé	Demande en forte croissance. Pour les cageots, caisses et palettes, les contraintes réglementaires d'hygiène favorisent le remplacement du bois par le plastique dans les secteurs alimentaire et des médicaments (HACCP).			Non précisée

Tableau 88 : Présentation de l'offre et la demande de PEHD recyclé pour les différentes applications

B. Situation actuelle

Structurellement, la demande en PEHD recyclé est supérieure à l'offre.

Le secteur qui absorbe majoritairement du PEHD recyclé est le secteur de la construction. Cependant, depuis début 2008, le secteur de la construction connaît un ralentissement économique conjoncturel. Ceci a pour conséquence un ralentissement de la demande en PEHD recyclé, lié au fait que les autres secteurs n'absorberont ce PEHD recyclé que dans le cas où les prix baissent de façon suffisamment durable.

C. Situation prospective

Le marché du PEHD issu des bouteilles est « réglementé » (les collectes sélectives sont mises en place par le législateur et le flux PEHD en fait partie) et la demande en PEHD recyclé est plus forte que l'offre ; dès lors on peut imaginer que toute tonne supplémentaire recyclée mise sur le marché trouvera un débouché.

Modélisation :

→ Le PEHD recyclé trouvera *a priori* structurellement un débouché, même s'il est possible que les situations conjoncturelles amènent parfois à un manque d'offre temporaire. L'intégration du PEHD recyclé dans des produits neufs n'est pas le facteur limitant. Les bénéfices du recyclage sont donc alloués à 100 % au système amont qui fournit la matière recyclée.

Les matières auxquelles se substitue le PEHD recyclé sont fonction des applications envisagées :

Applications possibles	Matériaux en concurrence avec la résine recyclée
Tuyaux pour la construction, conduits de câbles	PEHD vierge, PVC
Caisses, palettes, pots	Bois, PP
Accessoires ménagers (bacs rangement, étagères, corbeilles,...)	PEBD, PEHD vierge
Bouteilles pour usages alimentaires	PEHD vierge

Tableau 89 : Présentation des matériaux en concurrence avec le PEHD recyclé

Modélisation :

→ Filière sélectionnée : **Le PEHD recyclé sera utilisé dans la production de tuyaux (pour des fluides qui ne sont pas sous pression).** Dans le recyclage du PEHD en tuyaux, le PEHD recyclé remplace du PEHD vierge.

V.3.2.3 Données techniques utilisées

A. Qualité du PEHD recyclé

La qualité requise pour les applications est élevée. La présence d'impuretés dans le PEHD entraîne une détérioration de ses propriétés mécaniques.

Dans des applications à faible valeur ajoutée, les spécifications mécaniques sont peu contraignantes. De ce fait, les produits recyclés ne nécessitent pas de surdimensionnement par rapport aux produits fabriqués à partir de résine vierge.

Modélisation :

→ On peut considérer que dans l'application « tuyaux sans pression », le PEHD recyclé vient remplacer du PEHD vierge avec un taux de substitution élevé (environ 0,9). Cependant, on étudiera la sensibilité des résultats à une variation de ce paramètre entre 0.9 et 1.

B. Procédés de recyclage

B.1 Paillettes de PEHD

Le procédé de recyclage utilisé est similaire à celui du PET. Il consiste en différentes étapes rappelées ci-dessous :

- Broyage en paillettes,
- Lavage,
- Séchage
- Extrusion

Modélisation :

→ Le rendement d'une chaîne de recyclage en granules cristallisés est en moyenne de 90 %⁵⁷ en moyenne. Dans le cadre de la modélisation, nous prendrons une distribution normale de valeurs comprises entre de 85 % et 95 %.

Le recyclage en granules du PEHD implique les consommations reprises dans le tableau ci-dessous.

	Électricité	Eau	Détergent
Données de production PEHD	1 000 kWh/t entrante	900 L / t entrante	0,2 kg/t entrante

Tableau 90 : Consommations du recyclage du PEHD en paillettes par tonne entrante⁵⁸

Modélisation :

→ Dans la modélisation, nous prendrons une distribution uniforme de valeurs pour la consommation d'énergie, comprise entre 900 et 1 100 kWh /tonne entrante.
→ Nous ferons également varier les consommations d'eau et de détergent de +/-10 %.

C. Production de la résine vierge

Nous utilisons les données issues de la base de données PlasticsEurope⁵⁹ (voir Tableau 72).

D. Production de produits finis : tuyaux

Nous utilisons les données d'EcoInvent (Extrusion plastic pipes (N°1851, EcoInvent V2, 2007). La consommation d'électricité fournie pour ce procédé est de 0,508 kWh/kg.

V.3.3. Résultats

Le modèle correspondant à la décision de recycler une tonne supplémentaire de PEHD se décompose en plusieurs étapes ou phases.

Elles correspondent soit à des effets engendrés par la décision (et comptabilisées positivement) soit à des effets évités. Elles sont décrites dans le tableau ci-dessous.

Phases	Étapes considérées
Recyclage du PEHD	Recyclage-matériau (Recyclage PEHD en paillettes)
	Recyclage-application (Fabrication du tuyau recyclé)
	Recyclage - Transport (transport centre de tri-recycleur et recycleur-application)
Production évitée	Production évitée - matériau (Fabrication de paillettes de PEHD vierge)
	Production évitée - application Fabrication de tuyaux en PEHD vierge
	Production évitée - Transport (transport du producteur de matière vierge à l'application) ⁶⁰
Fin de vie évitée	Élimination en CSDU et/ou incinérateur évitée grâce au recyclage

Tableau 91 : Description des phases

⁵⁷ Source : d'après des visites de différents recycleurs en Europe, 2008, RDC Environment.

⁵⁸ Source : d'après des visites de différents recycleurs en Europe, 2008, RDC Environment.

⁵⁹ Eco-profiles of the European Plastics Industry, (Boustead for PlasticsEurope, Mars 2005)

⁶⁰ Le transport pour la fabrication de la matière vierge est compris dans la phase « Production évitée-matériau ». La donnée concernant cette étape de transport n'a pas pu être identifiée (données agrégées).

Rappel :

Les résultats sont exprimés en € 2007 par unité fonctionnelle
Ils donnent le coût environnemental total et le coût externe total.

Une valeur positive indique un coût pour la société et une valeur négative indique un bénéfice pour la société.

V.3.3.1 Scénario de base

Le scénario de base retient les hypothèses suivantes :

- Approche conséquentielle pour la production d'électricité
- Facteur de monétarisation de la consommation de ressource : 0,015 € / MJ primaire
- Facteur de monétarisation des gaz à effet de serre : prix actuel de la tonne de CO2 sur le marché européen d'échange de quotas de CO2 (20 € / t CO2)
- Calcul du coût externe : Taux d'internalisation des coûts de la ressource de 53 % (correspond à un prix e 64 \$ le baril)
- Calcul du coût externe : Taux d'internalisation des coûts des émissions de gaz à effet de serre de 100 % pour le CO2 et 0 % pour les autres gaz à effet de serre.
- Fin de vie évitée : caractéristique des ordures ménagères (53 % d'incinération avec un rendement thermique de l'incinérateur de 19,7 % et un rendement électrique de 8 %). Bilan par phase
 - **Coût environnemental total**

Le bénéfice environnemental total moyen est de 623 € / t PEHD recyclé.

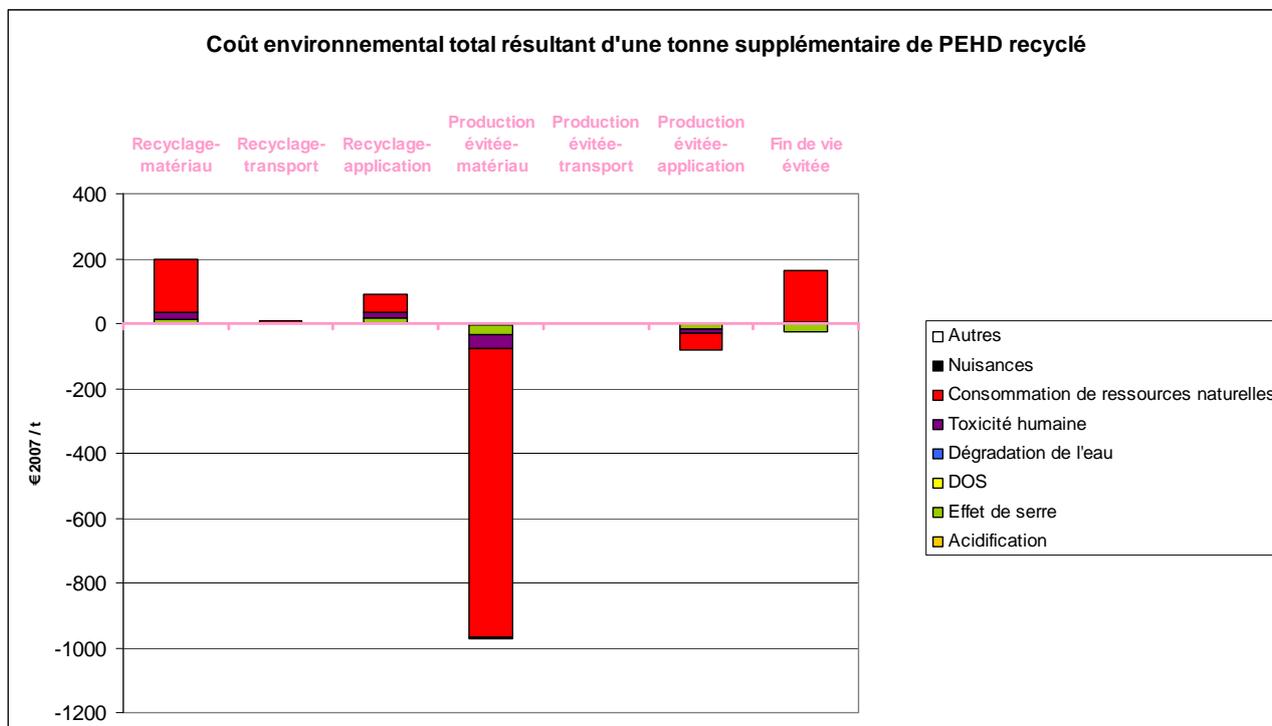


Figure 78 : Recyclage PEHD – Coût environnemental total - Résultats par phase

Phases	Acidification	Effet de serre	DOS	Dégradation de l'eau	Toxicité humaine	Consommation de ressources naturelles	Nuisances	Autres	Coût environnemental total
Recyclage-matériau	2	12	0	0	21	162	0	0	197
Recyclage-transport	0	1	0	0	1	6	0	0	7
Recyclage-application	1	16	0	1	15	58	0	0	91
Production évitée-matériau	-3	-32	0	0	-41	-894	0	0	-970
Production évitée-transport	0	0	0	0	0	-1	0	0	-1
Production évitée-application	-1	-15	0	-1	-13	-52	0	0	-82
Fin de vie évitée	0	-26	0	-1	3	159	0	0	136
Total	-1	-43	0	-1	-14	-563	0	0	-623

Phases	Acidification	Effet de serre	DOS	Dégradation de l'eau	Toxicité humaine	Consommation de ressources naturelles	Nuisances	Autres	Coût environnemental total
Recyclage-matériau	0%	2%	0%	0%	3%	26%	0%	0%	32%
Recyclage-transport	0%	0%	0%	0%	0%	1%	0%	0%	1%
Recyclage-application	0%	3%	0%	0%	2%	9%	0%	0%	15%
Production évitée-matériau	1%	5%	0%	0%	7%	144%	0%	0%	156%
Production évitée-transport	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Production évitée-application	0%	2%	0%	0%	2%	8%	0%	0%	13%
Fin de vie évitée	0%	4%	0%	0%	1%	26%	0%	0%	22%
Total	0%	7%	0%	0%	2%	90%	0%	0%	100%

Légende

	> 50 %
	20-50 %
	10-20 %
	6-10 %
	3-5%
	< 3 %

Tableau 92 : Recyclage PEHD – Coût environnemental total -Résultats chiffrés (en valeur absolue)⁶¹

⁶¹ Les pourcentages sont calculés par rapport au coût total, en valeur absolue. Dès lors, les contributions relatives peuvent être supérieures à 100%.

Le graphique et les tableaux ci-dessus montrent que les phases qui coûtent d'un point de vue environnemental sont, par ordre d'importance :

- le recyclage du PEHD en paillettes (32 %) ;
- la fabrication de l'application qui utilise la matière recyclée, à savoir les tuyaux en PEHD recyclé (15 %) ;
- la fin de vie évitée : en effet, en recyclant, on évite une part d'incinération qui elle-même permettait d'éviter la production de chaleur et la production d'électricité (13 %).

A l'inverse, les phases qui génèrent des bénéfices sont les phases de production évitée (production de paillettes de PEHD vierge 156 %, fabrication du tuyau vierge 13 %).

Les transports pèsent seulement pour 1 % des impacts environnementaux.

Les économies de matière vierge impactent favorablement le bilan environnemental au travers des catégories d'impact des consommations de ressources fossiles (144 %) et dans une moindre mesure de la toxicité humaine (7 %) et l'effet de serre (5 %).

La production évitée génère la majeure partie du bénéfice environnemental : les gains environnementaux totaux représentent 3 fois les coûts environnementaux liés au recyclage et à la fin de vie évitée.

• **Coût externe total**

Le bénéfice environnemental externe moyen est de 284 € / tonne de PEHD recyclé.

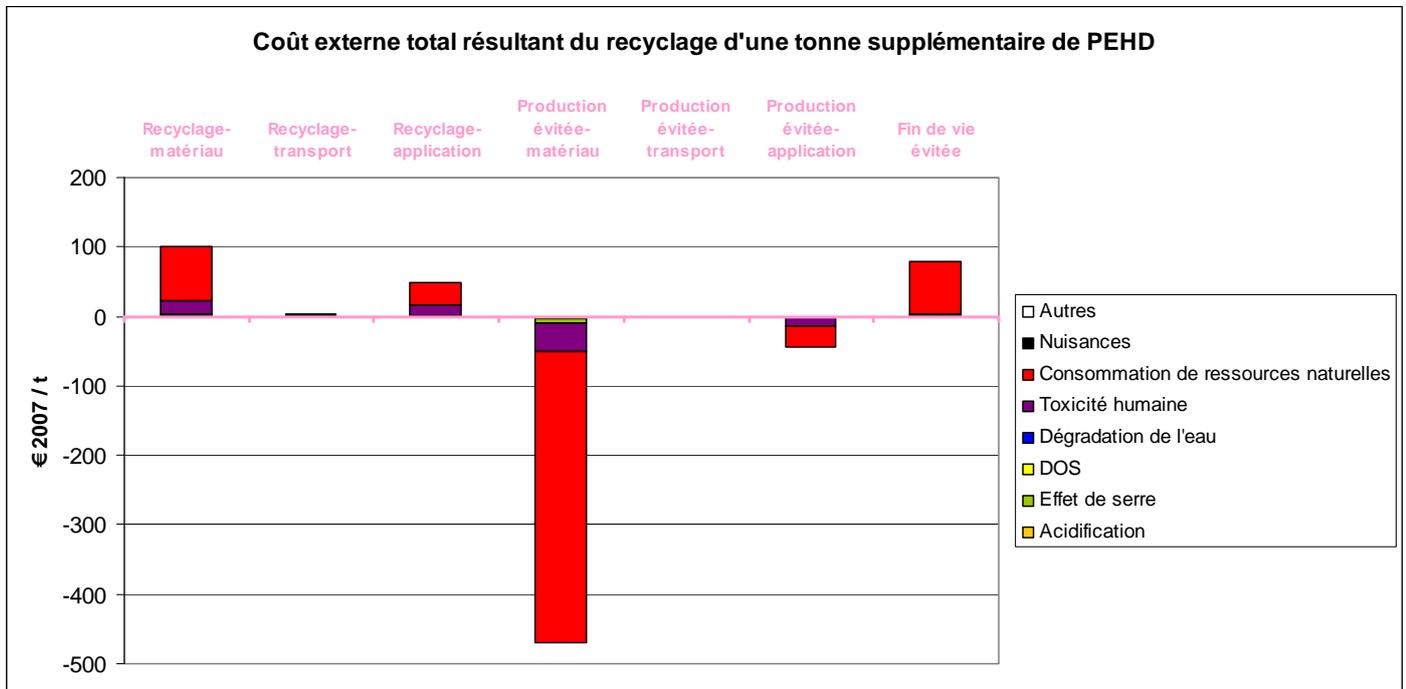


Figure 79 : Recyclage PEHD – Coût externe total - Résultats par phase

Phases	Acidification	Effet de serre	DOS	Dégradation de l'eau	Toxicité humaine	Consommation de ressources naturelles	Nuisances	Autres	Coût environnemental total
Recyclage-matériau	2	1	0	0	21	76	0	0	100
Recyclage-transport	0	0	0	0	1	3	0	0	4
Recyclage-application	1	1	0	0	15	32	0	0	48
Production évitée-matériau	-3	-6	0	0	-41	-420	0	0	-470
Production évitée-transport	0	0	0	0	0	-1	0	0	-1
Production évitée-application	-1	-1	0	0	-13	-29	0	0	-43
Fin de vie évitée	0	0	0	0	3	75	0	0	78
Total	-1	-5	0	0	-14	-263	0	0	-284

0.467948049

Phases	Acidification	Effet de serre	DOS	Dégradation de l'eau	Toxicité humaine	Consommation de ressource	Nuisances	Autres	Coût externe total
Recyclage-matériau	1%	0%	0%	0%	7%	27%	0%	0%	35%
Recyclage-transport	0%	0%	0%	0%	0%	1%	0%	0%	1%
Recyclage-application	0%	0%	0%	0%	5%	11%	0%	0%	17%
Production évitée-matériau	1%	2%	0%	0%	14%	148%	0%	0%	165%
Production évitée-transport	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Production évitée-application	0%	0%	0%	0%	5%	10%	0%	0%	15%
Fin de vie évitée	0%	0%	0%	0%	1%	26%	0%	0%	27%
Total	0%	2%	0%	0%	5%	93%	0%	0%	100%

Légende

	> 50 %
	20-50 %
	10-20 %
	6-10 %
	3-5%
	< 3 %

Tableau 93 : Recyclage PEHD – Coût environnemental total - Résultats chiffrés (en valeur absolue) ⁶²

⁶² Les pourcentages sont calculés par rapport au coût total, en valeur absolue. Dès lors, les contributions relatives peuvent être supérieures à 100 %.

Les résultats présentés ci-dessus confirment les résultats précédents en termes de tendance.

En revanche en termes de valeur absolue, les valeurs sont quasiment divisées par 2 par rapport aux coûts environnementaux totaux car le coût du CO2 ont été internalisés et que ceux de l'énergie le sont en grande partie.

Les économies de matière vierge impactent favorablement le bilan environnemental au travers des catégories d'impact des consommations de ressources fossiles (148 %) et dans une moindre mesure de la toxicité humaine (14 %). La part de la toxicité humaine devient plus importante, car aucun coût lié à cet impact n'est internalisé.

A. Analyse de sensibilité

Le tableau ci-dessous indique l'influence d'une variation réaliste des paramètres du modèle sur les résultats :

Paramètre	Intervalle de valeur	Influence
Taux de substitution	0.9-1	Forte
Efficacité de recyclage (rendement)	85-95 %	Moyenne
Consommation d'électricité pour le recyclage du PEHD	1000 kWh / t +/- 10 %	Faible
Distance entre le recycleur et le fabricant de bouteille	200-600 km	Très faible
Distance entre le centre de tri et le recycleur	100-200 km	Nulle
Consommation d'eau pour le recyclage du PEHD	900 L / t +/- 10 %	Nulle
Consommation de détergent pour le recyclage du PEHD	0.2 / t +/- 10 %	Nulle

Tableau 94 : Recyclage du PEHD - Influence des paramètres

Les graphiques ci-dessous sont le résultat de 1 000 itérations de calculs combinant les variantes de modélisations en fonction de ces différents paramètres :

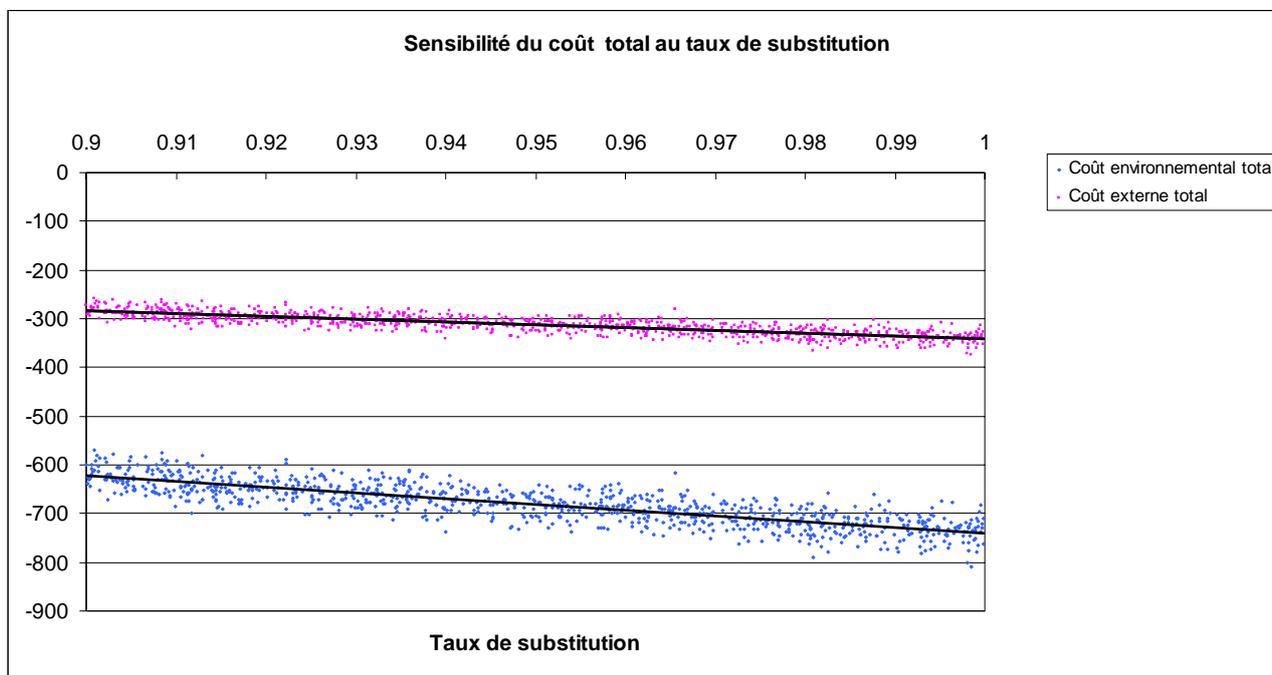


Figure 80 : Recyclage du PEHD - Sensibilité des coûts totaux en fonction du taux de substitution

Le graphe ci-dessus indique que plus le taux de substitution est élevé, plus grand est le bénéfice environnemental. L'augmentation de 10 % du taux de substitution entraîne un bénéfice environnemental de 20 % pour le coût externe total comme pour le coût environnemental total.

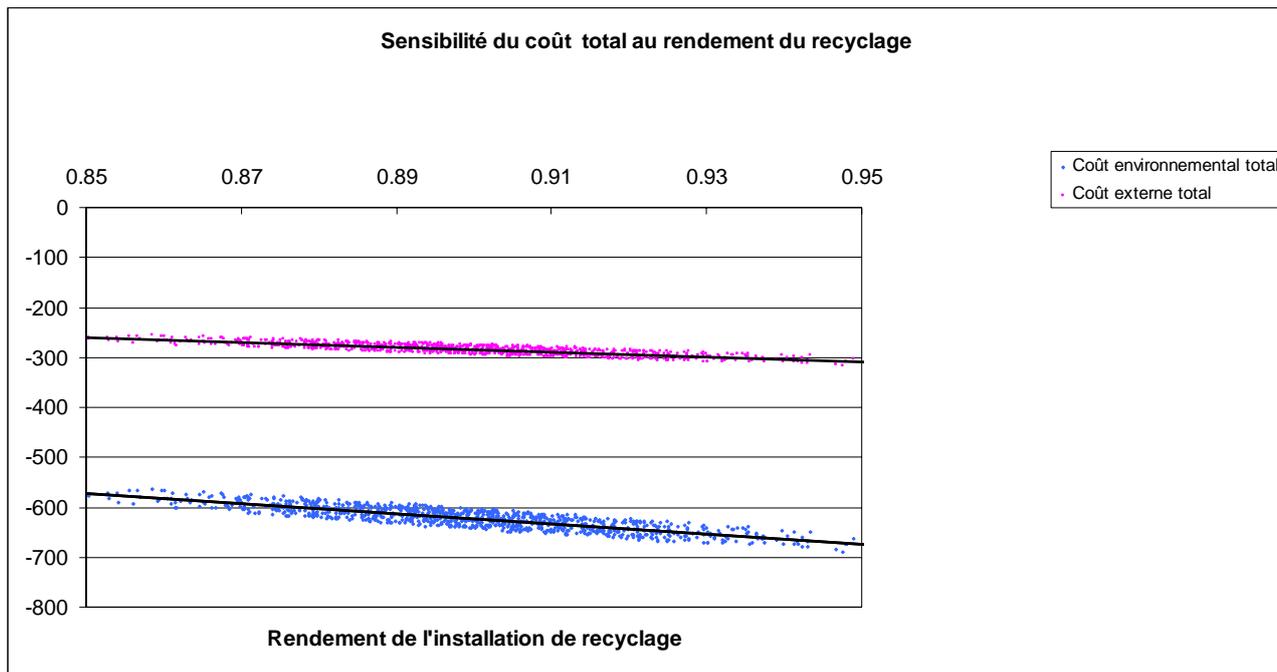


Figure 81 : Recyclage du PEHD - Sensibilité des coûts totaux en fonction de l'efficacité de recyclage

Le graphique ci-dessus indique que meilleure est l'efficacité de recyclage, meilleurs sont les bénéfices environnementaux. Le gain d'1 % de rendement (autour de la valeur moyenne de 90 %) permet une amélioration d'environ 2 % du bénéfice environnemental.

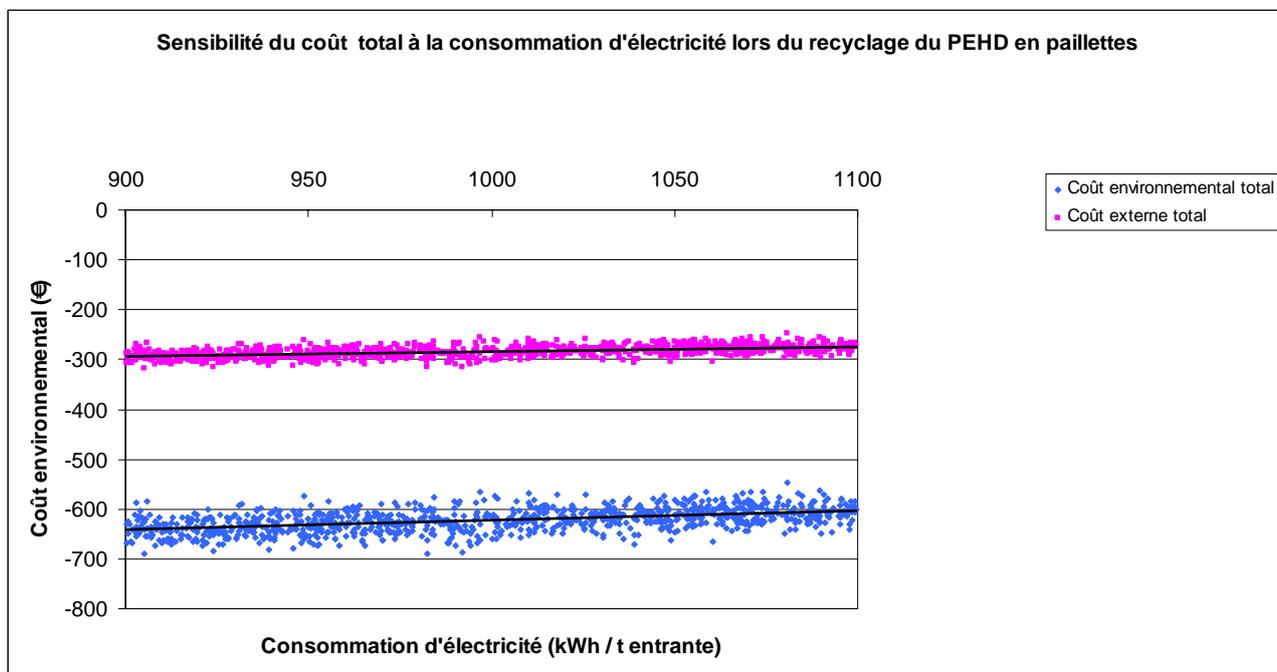


Figure 82 : Recyclage du PEHD - Sensibilité des coûts totaux en fonction de la consommation électrique du recyclage

Le graphique ci-dessus indique que la consommation d'électricité de l'étape de recyclage a peu d'influence sur les résultats. L'augmentation de 100 kWh / kg de cette consommation engendre une détérioration d'environ 1 % du bénéfice environnemental.

V.3.3.2 Variantes

A. Variante liée au choix du mix électrique

Coût environnemental du recyclage d'une tonne de PEHD	Coût environnemental	Coût externe
Variante mix conséquentiel	-623	-284
Variante mix moyen	-657	-303

Tableau 95 : Recyclage du PEHD - Résultats du scénario de base et de sa variante

Le tableau ci-dessus montre que dans tous les cas, le recyclage du PEHD se traduit par un bénéfice environnemental pour la société.

Les différences de coût entre les deux scénarios sont relativement faibles (5 %). Cependant cette différence est plus importante que pour le PET.

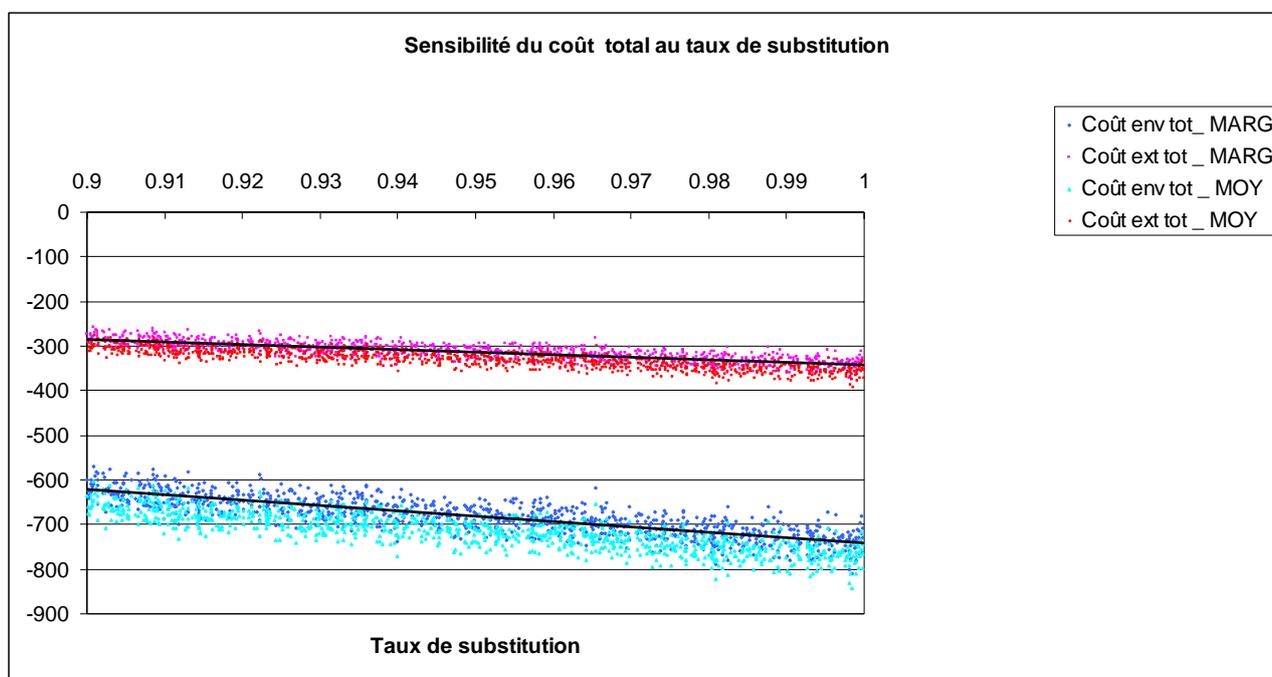


Figure 83 : Recyclage du PEHD - Sensibilité des coûts totaux en fonction du taux de substitution comparaison de l'approche conséquentielle et moyenne

Le montant des coûts externes totaux est environ deux fois moins élevé que le montant des coûts environnementaux totaux. Ceci est principalement dû à l'internalisation des coûts de l'énergie, dont la consommation représente la plus grande partie des impacts.

B. Variantes liées à la monétarisation de la catégorie d'impact "consommation de ressources"

Ces variantes portent sur deux paramètres :

- Scénario de base :
 - Le coût environnemental lié à la consommation d'énergie se base sur un prix de 64 \$ le baril (soit une internalisation de 53 %).

- Le facteur de monétarisation de la consommation de ressources fossiles est de 0,015 € / MJ primaire.
- Variation sur le degré d'internalisation (ne concerne que le coût externe) :
 - Le coût environnemental lié à la consommation d'énergie se base sur un prix de 100 \$ le baril
 - Le coût environnemental lié à la consommation d'énergie se base sur un prix de 150 \$ le baril
- Variation sur le facteur de monétarisation de la consommation de ressources fossiles :
 - Le facteur de monétarisation de la consommation de ressources fossiles est de 0,012 € / MJ primaire.
 - Le facteur de monétarisation de la consommation de ressources fossiles est de 0,018 € / MJ primaire.

Coût environnemental du recyclage d'une tonne de PEHD		Coût environnemental total	Coût externe		
			Prix de 64\$ le baril	Prix de 100\$ le baril	Prix de 150\$ le baril
Valeur retenue	0,015 e/MJ	-623	-284	-68	-21
Valeur basse	0,012 e/MJ	--510	-178	-21	-21
Valeur haute	0,018 e/MJ	-735	-404	-236	-21

Tableau 96 : Résultats du recyclage du PEHD selon le prix du baril de pétrole

Le tableau ci-dessus montre les mêmes tendances que celles observées avec le PET :

- la valeur du facteur de monétarisation influence fortement le coût environnemental total : la variation du coût est directement liée à celle du facteur de monétarisation, car la catégorie « consommation de ressources » est de loin la plus contributive dans le bilan environnemental du recyclage ;
- la variation du prix du baril a une incidence très forte sur le coût externe total. Pour un prix du baril de 150 \$, le prix de l'énergie est totalement internalisé, et de ce fait le coût externe est très bas et ne représente plus que le coût monétarisé des autres catégories d'impact.

C. Variantes liées à la monétarisation de la catégorie d'impact « effet de serre »

Coût environnemental du recyclage d'une tonne de PEHD		Coût environnemental total	Coût externe		
			0 % internalisation pour tous les GES	100 % internalisation CO2, 0 % pour autres GES	100 % internalisation
Objectif Kyoto	20 € / t CO2	-623	-322	-284	-279
Objectif Durabilité, valeur basse	50 € / t CO2	-687	-387	-292	-279
Objectif Durabilité, valeur haute	96 € / t CO2	-787	-487	-304	-279

Tableau 97 : Recyclage du PEHD - Résultats du scénario Mix consécutif selon le degré d'internalisation des coûts des émissions de gaz à effet de serre

Le tableau ci-dessus montre que la valeur du facteur de monétarisation des gaz à effet de serre influence fortement le coût environnemental total (variation de 26 % de la valeur du coût entre l'hypothèse de 20 € / t CO2 et 96 € / t CO2) et le coût environnemental externe en cas d'internalisation nulle (situation peu probable).

Si le degré d'internalisation est fort, la valeur du facteur de monétarisation influence peu les résultats (variation maximum de 5 %).

L'internalisation des coûts de **tous** les gaz à effet de serre en plus du CO₂ influence faiblement la valeur du coût environnemental externe considéré.

D. Variante liées à la fin de vie évitée : sensibilité au rendement de l'incinération

L'objectif de cette variante vise à comparer le recyclage à une fin de vie évitée dans une installation visant à récupérer l'énergie (type cimenterie...)

- Scénario de base :
 - 53 % d'incinération en incinérateur ordures ménagères classique (rendement thermique : 19.7 %)
 - 47 % de mise en décharge
- Variante :
 - 100 % d'incinération avec un rendement thermique variant de 40 %⁶³ à 95 % (et 0 % de rendement électrique).
 - 0 % de mise en décharge

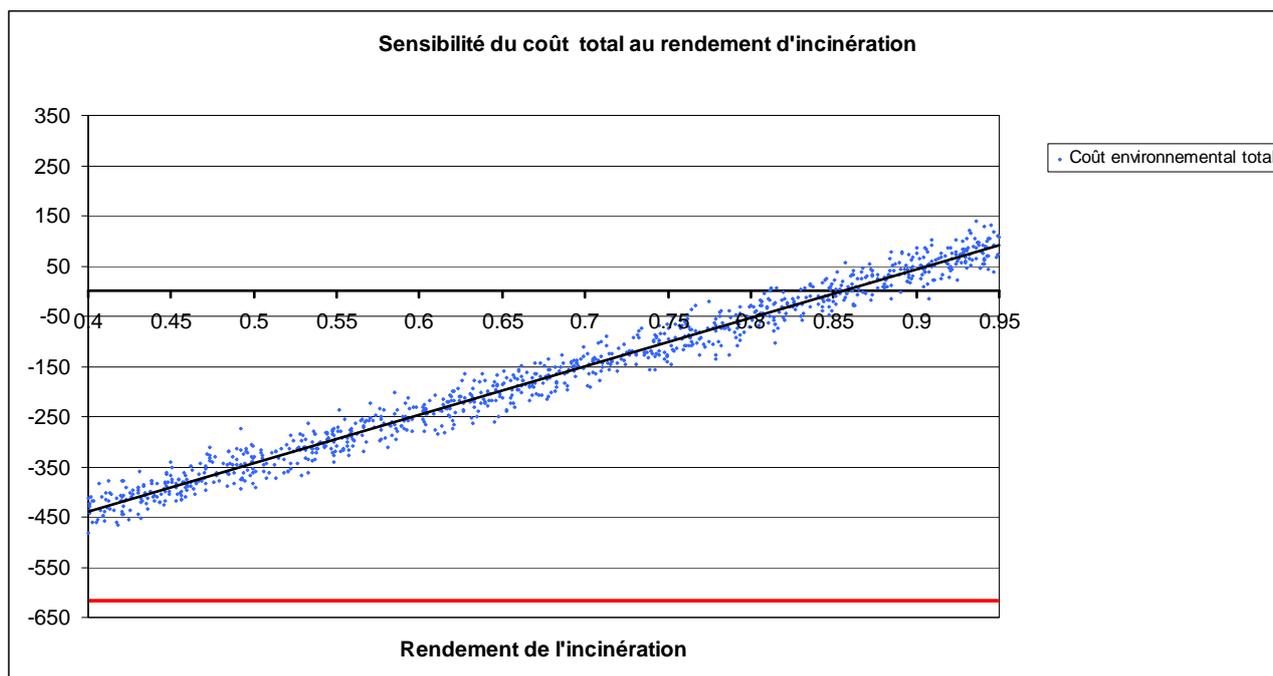


Figure 84 : Recyclage du PEHD - Résultats de l'évolution du coût environnemental en fonction du rendement de l'incinération

Le bénéfice environnemental diminue lorsque la fin de vie évitée est une incinération à haut rendement. En effet, le fait de ne plus incinérer la bouteille en PEHD revient à ne plus bénéficier d'un avantage environnemental lié à l'incinération

⁶³ Le rendement de 40 % correspond au rendement moyen d'un UIOM valorisant l'énergie uniquement sous forme thermique.

(l'économie de consommation de ressources fossiles). De ce fait, plus le rendement de l'incinération est élevé, plus il est bénéfique pour l'environnement et donc plus la phase fin de vie évitée est impactante.

De plus, il existe un seuil de rendement à partir duquel le recyclage devient défavorable d'un point de vue environnemental : passé 85 % de rendement d'incinération, l'impact de la fin de vie évitée devient supérieur au bénéfice environnemental lié à l'économie de matière première.

V.4 Recyclage de PEBD provenant de films

V.4.1. Contexte

Les films en PEBD sont segmentés en deux types de films :

- Les films étirables (60 % du marché) : ces films sont très fins et poreux ; ce marché est en expansion ;
- Les films thermo-rétractables (40 % du marché).

A l'heure actuelle, il n'existe pas de collecte sélective généralisée des films à l'échelle de la France.

V.4.2. Hypothèse de modélisation

V.4.2.1 Unité fonctionnelle

L'unité fonctionnelle modélisée est le recyclage une tonne supplémentaire de film de palettisation en France (film étirable).

V.4.2.2 État du marché des matières secondaires

A. Introduction

Le gisement total de déchets de films PEBD en Europe est de 2 650 kilotonnes dont

- 1 400 kilotonnes de films étirables ;
- 650 kilotonnes de films thermo-rétractables.

Le taux de collecte atteint 45 % en moyenne.

Les films étirables sont très fins et fréquemment pollués. Du fait de leur porosité ils accumulent une forte proportion d'humidité lors de leur lavage et une hétérogénéité des points de fusion des granulés.

Les films thermo-rétractables présentent moins de difficultés au recyclage.

Différents débouchés existent pour le PEBD recyclé dont les principales pour les films sont :

- Les sacs poubelles ;
- Les films agricoles et de construction (l'application films étirables n'utilise pas de recyclé).

Le tableau ci-dessous récapitule la demande en PEBD recyclé et les différentes applications décrites.

Produits		Sacs poubelles	Film agricole, film construction, tuyaux d'arrosage (type goutte à goutte)	Tuyaux pour la construction	Sacs épais	Film de palettisation	Autres (produits moulés par «extrusion /compression /moulage»..)
Type de boucle		Ouverte	Ouverte	Ouverte	Ouverte	Fermée	Ouverte
Déchets utilisés		-Film rétractable -Film agricole -Film étirable -Sacs épais -Film emballage alimentaire	-Film rétractable -Sacs -Film agricole -Film étirable -Film emballage alimentaire	-Film rétractable -Film étirable -Sacs -Film emballage alimentaire	-Film rétractable -Film agricole -Sacs	- Film étirable propre (pour l'étirable recyclé)	-Film rétractable -Film emballage alimentaire
Part (%) du recyclé dans les produits	Actuelle	60 % à 100 %	15 % Uniquement pour le film de paillage.	5 à 10 %	10 à 30 %	<3 %	
	Maximale théorique	100%	Principalement pour les films de paillage. Peu de recyclé dans les films tunnel et de serre	30%	Essais réalisés jusqu'à 80% de recyclé mais nombreux problèmes de qualité (couleur, texture)	Faible	
Demande totale de produits (Europe, 1000 tonnes)	Vierge	100 kt	Agricole : 380 kt Construction : 240 kt	300 kt	250 kt	2 000 kt	
	Recyclé	400 kt	40 kt	5 kt	5 kt		
Evolution probable de la demande de produits (% annuel)	Vierge	+ 1 %	+3 %	+5 %	0 %	+2 %	+5 %
	Recyclé	Marché saturé en Europe Demande croissante dans les pays émergents		Demande en forte croissance dans les pays émergents		Non précisé	Non précisé

Tableau 98 : Présentation de l'offre et la demande de PEBD recyclé pour les différentes applications

B. Situation actuelle

Actuellement, le débouché le plus important est réparti entre deux applications pour les films étirables : les sacs poubelles (demande de 400 kilotonnes) et les films agricoles (demande de 40 kilotonnes).

C. Situation prospective

Une approche prospective indique que de nouvelles applications liées à une forte demande des pays émergents (sacs poubelles, films agricole, tuyaux pour la construction, sacs épais) vont voir le jour et sont en forte croissance. Il manque de données sur la qualité du PEBD recyclé requis pour la valorisation en tuyaux.

Dès lors, le recyclage d'une tonne supplémentaire devrait aller vers des applications de ce type.

Modélisation :

- Le PEBD recyclé trouvera a priori un débouché. L'intégration du PEBD-R dans des produits neufs n'est pas le facteur limitant. Les bénéfices du recyclage sont donc alloués à 100 % au système amont qui fournit la matière recyclée.

Applications possibles	Matériaux en concurrence avec la résine recyclée
Sacs poubelles	PEHD (minoritaire)
Film agricole	PEBD vierge
Film pour la construction	PP, PEBD vierge
Sacs épais	Papier
Film de palettisation	PEBD vierge
Produits moulés par extrusion/compression/moulage	Plastiques mélangés, Elastomères, PEBD vierge e

Tableau 99 : Présentation des matériaux en concurrence avec le PEBD recyclé

Modélisation :

- Filière sélectionnée : **Le PEBD recyclé sera utilisé dans la production de films en PEBD (type sacs poubelles). Dans le recyclage du PEBD en tuyau, le PEBD recyclé remplace du PEHD vierge.**

V.4.2.3 Données techniques utilisées

A. Qualité du PEBD recyclé

La qualité du PEBD recyclé est forte dans l'application sacs poubelles. Une surépaisseur peut être envisagée dans certains cas.

Note : En revanche, dans l'application films agricoles, une surépaisseur des films est envisagée de façon systématique (de l'ordre de 180 microns pour le recyclé par rapport à 125 microns pour la résine vierge, soit une surépaisseur de 44 %). Autrement dit, il faut 44 % de matière recyclée en plus pour avoir la même qualité qu'une tonne de matière vierge.

Modélisation :

→ Le taux de substitution pour les sacs poubelles sera de **0,9**.

Cependant, compte-tenu d'autres applications pour lesquelles le taux de substitution peut être plus faible, on fera varier ce **taux de substitution considéré selon une distribution uniforme entre 0,7 et 1**.

B. Procédés de recyclage et de production**B.1 Fabrication des paillettes**

Le procédé de recyclage utilisé est similaire à celui du PET. Il consiste en différentes étapes rappelées ci-dessous :

- Broyage en paillettes,
- Lavage,
- Séchage,
- Extrusion.

Modélisation :

→ Le rendement d'une chaîne de recyclage en paillettes est en moyenne de 90 %⁶⁴ en moyenne.

→ Cependant, compte-tenu des incertitudes, dans le cadre de la modélisation, nous prendrons une distribution normale de valeurs comprises entre de 85 % et 95 %.

Le recyclage en granules du PEBD implique les consommations reprises dans le tableau ci-dessous.

	Électricité	Eau	Détergent
Données de production PEBD	1 000 kWh	900 L	0,2 kg

Tableau 100 : Consommations du recyclage du PEBD en paillettes en tonnes entrantes⁶⁵

Modélisation :

→ **Compte-tenu de l'incertitude de ces valeurs**, dans la modélisation, nous prendrons une distribution uniforme de valeurs pour la consommation d'énergie, comprise **entre 900 et 1 100 kWh /tonne entrante**.

→ Nous ferons également varier les consommations d'eau et de détergent (+/-10 %).

C. Fabrication de la matière vierge

Nous utilisons les données issues de la base de données EcoInvent⁶⁶ (voir Tableau 72).

D. Fabrication des produits finis

La production de la matière remplacée est une production de tuyaux de PEBD vierge.

Il s'agit donc de modéliser la production de paillettes de PEBD puis l'extrusion de ces paillettes en films.

La production de film est présentée dans la Figure 71. Le polymère fondu est extrudé comme un tube continu. Quand il sort de l'extrudeuse, le tube est gonflé avec de l'air pour former une bulle. Lorsque la bulle atteint la taille appropriée, elle est refroidie à l'air et se transforme en un film solide. Le moment où a lieu la solidification, appelé le point de fusion (frost line), est le moment où l'épaisseur requise est atteinte. Le tube est ensuite guidé par des rouleaux pour être aplati, et ses bords scellés. Le scellement est totalement dépendant de la pression des rouleaux.

⁶⁴ Source : d'après des visites de différents recycleurs en Europe, 2008, RDC Environnement.

⁶⁵ Source : d'après des visites de différents recycleurs en Europe, 2008, RDC Environnement.

⁶⁶ LDPE granulate at plant (N°1830, EcoInvent, V1.3 2006)

Les enjeux majeurs de cette production résident dans le maintien d'une pression constante lors de la réalisation de la bulle et le refroidissement de la surface de la bulle qui doit être homogène pour éviter de déformer la bulle ou de faire adhérer le film aux rouleaux.

Le film est ensuite pré-découpé.

Le film fabriqué est délicat et doit être emballé avec précaution pour ne pas être endommagé.

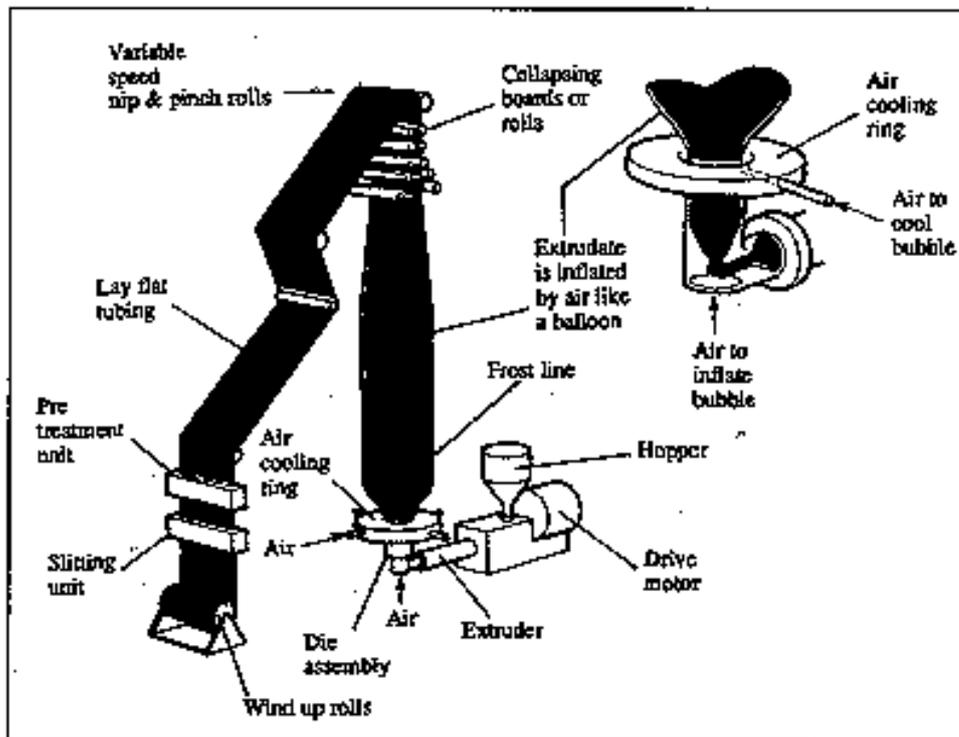


Figure 101 : Schéma de fonctionnement d'une extrusion de film PEBD (Source : Plastics Europe)

V.4.3. Résultats

Le modèle correspondant à la décision de recycler une tonne supplémentaire de PEBD se décompose en plusieurs étapes ou phases.

Elles correspondent soit à des effets engendrés par la décision (et comptabilisées positivement) soit à des effets évités. Elles sont décrites dans le tableau ci-dessous :

Phases	Étapes considérées
Recyclage du PEBD	Recyclage matériau (Recyclage PEBD en paillettes)
	Recyclage-application (Fabrication du film recyclé)
	Recyclage - transport (Transport centre de tri-recycleur et recycleur-application)
Production évitée	Production évitée - matériau (Fabrication de paillettes de PEBD vierge)
	Production évitée - application (Fabrication de films en PEBD vierge)
	Production évitée - Transport (transport du producteur de matière vierge à l'application) ⁶⁷
Fin de vie évitée	Élimination en CSDU et/ou incinérateur évitée grâce au recyclage

Tableau 102 : Recyclage du PEBD - Description des phases

⁶⁷ Le transport lié des matières premières pour la production du PEBD vierge est contenu dans la phase « Production évitée-matériau ». L'accès à ces données n'était pas possible (données agrégées).

V.4.3.1 Scénario de base

Rappel :

Les résultats sont exprimés en € 2007 par unité fonctionnelle
Ils donnent le coût environnemental total et le coût externe total.

Une valeur positive indique un coût pour la société et une valeur négative indique un bénéfice pour la société.

Le scénario de base retient les hypothèses suivantes :

- Approche conséquentielle pour la production d'électricité
- Facteur de monétarisation de la consommation de ressource : 0,015 € / MJ primaire
- Facteur de monétarisation des gaz à effet de serre équivalent à l'objectif de Kyoto (20 € / t CO2)
- Calcul du coût externe : Taux d'internalisation des coûts de la ressource de 53 % (correspond à un prix de 64 \$ le baril)
- Taux d'internalisation des coûts des émissions de gaz à effet de serre de 100 % pour le CO2 et 0 % pour les autres gaz à effet de serre.

A. Bilan par phase

- **Coût environnemental total**

Le bénéfice environnemental total moyen est de 746 € / t PEBD recyclé.

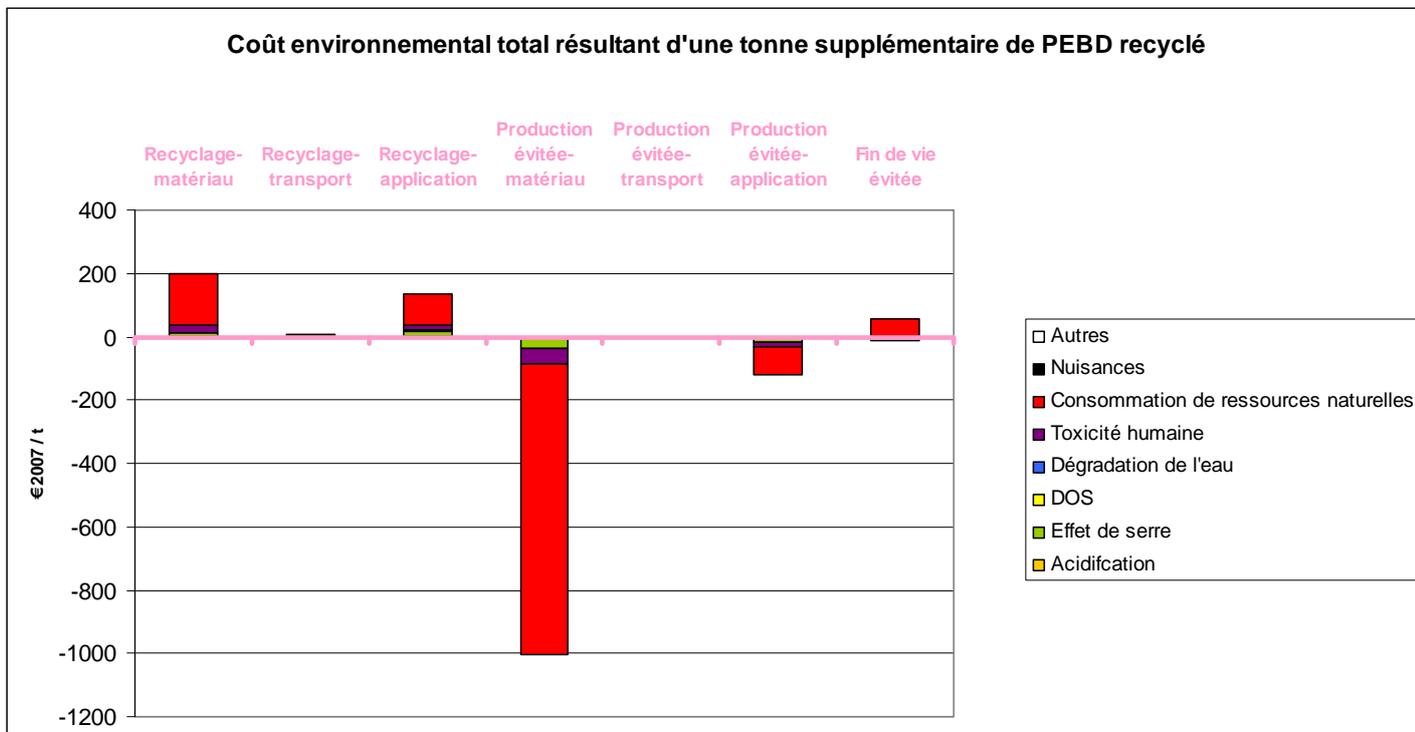
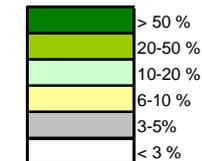


Figure 85 : Recyclage du PEBD - Résultats par phase du coût environnemental total

Phases	Acidification	Effet de serre	DOS	Dégradation de l'eau	Toxicité humaine	Consommation de ressources naturelles	Nuisances	Autres	Coût environnemental total
Recyclage-matériau	2	12	0	0	21	162	0	0	197
Recyclage-transport	0	0	0	0	1	5	0	0	7
Recyclage-application	1	18	0	1	16	97	0	0	134
Production évitée-matériau	-4	-35	0	0	-47	-920	0	0	-1006
Production évitée-transport	0	0	0	0	0	-2	0	0	-2
Production évitée-application	-1	-16	0	-1	-15	-87	0	0	-120
Fin de vie évitée	0	-11	0	-1	1	57	0	0	45
Total	-2	-32	0	-1	-23	-688	0	0	-746

Phases	Acidification	Effet de serre	DOS	Dégradation de l'eau	Toxicité humaine	Consommation de ressources naturelles	Nuisances	Autres	Coût environnemental total
Recyclage-matériau	0%	2%	0%	0%	3%	22%	0%	0%	26%
Recyclage-transport	0%	0%	0%	0%	0%	1%	0%	0%	1%
Recyclage-application	0%	2%	0%	0%	2%	13%	0%	0%	18%
Production évitée-matériau	1%	5%	0%	0%	6%	123%	0%	0%	135%
Production évitée-transport	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Production évitée-application	0%	2%	0%	0%	2%	12%	0%	0%	16%
Fin de vie évitée	0%	1%	0%	0%	0%	8%	0%	0%	6%
Total	0%	4%	0%	0%	3%	92%	0%	0%	100%

Légende

Tableau 103 : Recyclage du PEBD - Résultats chiffrés (en valeur absolue) du coût environnemental total ⁶⁸

⁶⁸ Les pourcentages sont calculés par rapport au coût total, en valeur absolue. Dès lors, les contributions relatives peuvent être supérieures à 100 %.

Le graphique et les tableaux ci-dessus montrent que les phases qui coûtent d'un point de vue environnemental sont, par ordre d'importance :

- le recyclage du PEBD en paillettes (26 %) ;
- la fabrication de l'application qui utilise la matière recyclée, à savoir les films en PEBD recyclé (18 %) ;
- la fin de vie évitée : en effet, en recyclant, on évite une part d'incinération qui elle-même permettait d'éviter la production de chaleur et la production d'électricité (6 %).
- A l'inverse, les phases qui génèrent des bénéfices sont les phases de production évitée (production de paillettes de PEBD vierge 135 %, fabrication du film vierge 16 %).

Les transports pèsent seulement pour 1 % des impacts environnementaux.

Les économies de matière vierge impactent favorablement le bilan environnemental au travers des catégories d'impact des consommations de ressources fossiles (123 %) et dans une moindre mesure de la toxicité humaine (6 %) et l'effet de serre (5 %).

La production évitée génère la majeure partie du bénéfice environnemental : les gains environnementaux totaux représentent 3,5 fois les coûts environnementaux liés au recyclage et à la fin de vie évitée.

• **Coût externe total**

Le bénéfice environnemental externe moyen est de 354 € / tonne de PEBD recyclé.

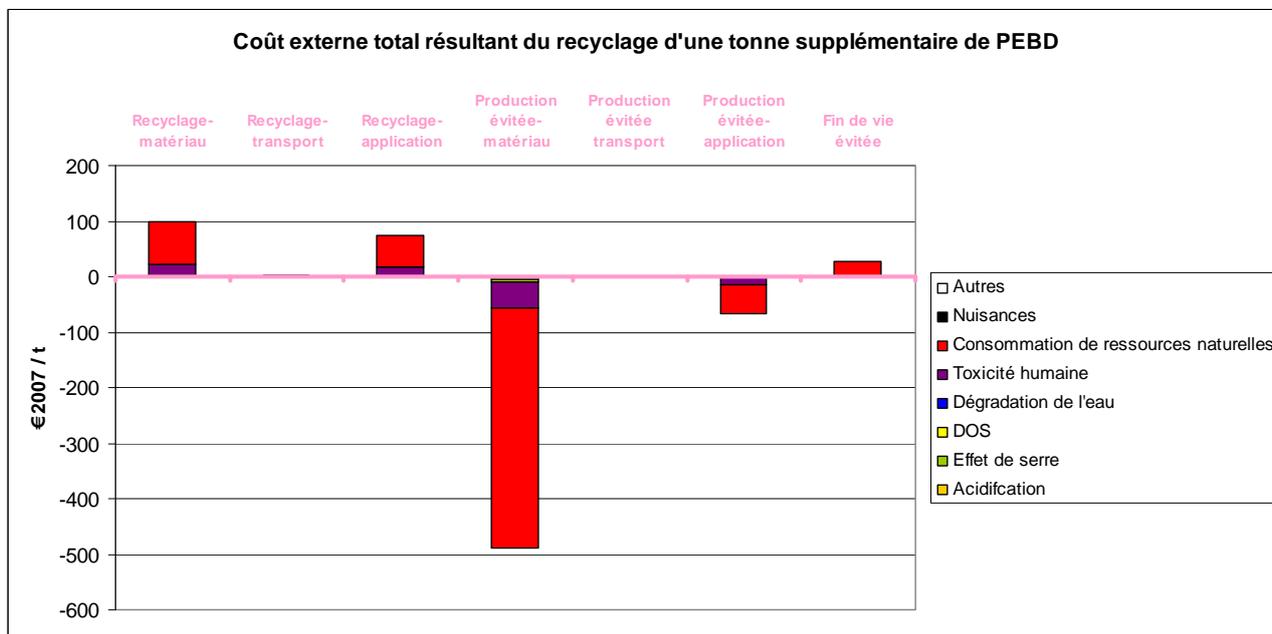


Figure 86 : Recyclage du PEBD - Résultats par phase du coût externe total

Phases	Acidification	Effet de serre	DOS	Dégradation de l'eau	Toxicité humaine	Consommation de ressources naturelles	Nuisances	Autres	Coût environnemental total
Recyclage-matériau	2	1	0	0	21	76	0	0	100
Recyclage-transport	0	0	0	0	1	2	0	0	3
Recyclage-application	1	0	0	0	16	56	0	0	73
Production évitée-matériau	-4	-7	0	0	-47	-431	0	0	-490
Production évitée transport	0	0	0	0	0	-1	0	0	-1
Production évitée-application	-1	0	0	0	-15	-50	0	0	-66
Fin de vie évitée	0	-1	0	0	1	27	0	0	26
Total	-2	-7	0	0	-23	-321	0	0	-354

Phases	Acidification	Effet de serre	DOS	Dégradation de l'eau	Toxicité humaine	Consommation de re:	Nuisances	Autres	Coût externe total
Recyclage-matériau	0%	0%	0%	0%	6%	21%	0%	0%	28%
Recyclage-transport	0%	0%	0%	0%	0%	1%	0%	0%	1%
Recyclage-application	0%	0%	0%	0%	5%	16%	0%	0%	21%
Production évitée-matériau	1%	2%	0%	0%	13%	122%	0%	0%	138%
Production évitée transport	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Production évitée-application	0%	0%	0%	0%	4%	14%	0%	0%	19%
Fin de vie évitée	0%	0%	0%	0%	0%	8%	0%	0%	7%
Total	1%	2%	0%	0%	7%	91%	0%	0%	100%

Légende

	> 50 %
	20-50 %
	10-20 %
	6-10 %
	3-5%
	< 3 %

Tableau 104 : Recyclage du PEBD - Résultats chiffrés (en valeur absolue) ⁶⁹

⁶⁹ Les pourcentages sont calculés par rapport au coût total, en valeur absolue. Dès lors, les contributions relatives peuvent être supérieures à 100 %.

Les résultats présentés ci-dessus confirment les résultats précédents en termes de tendance.

En revanche en termes de valeur absolue, les valeurs sont quasiment divisées par 2 par rapport aux coûts environnementaux totaux car le coût de l'énergie a été internalisé en grande partie.

Les économies de matière vierge impactent favorablement le bilan environnemental au travers des catégories d'impact des consommations de ressources fossiles et dans une moindre mesure de la toxicité humaine. La part de la toxicité humaine devient plus importante, car aucun coût lié à cet impact n'est internalisé.

B. Analyse de sensibilité

Le tableau ci-dessous indique l'influence d'une variation réaliste des paramètres du modèle sur les résultats :

Paramètre	Intervalle de valeur	Influence
Taux de substitution	0.7-1	Forte
Efficacité de recyclage (rendement)	0.85-0.95	Moyenne
Consommation d'électricité pour le recyclage du PEBD	1000 kWh / t +/- 10 %	Faible
Distance entre le centre de tri et le recycleur	100-200 km	Nulle
Distance entre le recycleur et le fabricant de bouteille	200-600 km	TNulle
Consommation d'eau pour le recyclage du PEBD	900 L/t +/-10 %	Nulle
Consommation de détergent pour le recyclage du PEBD	0.2 kg / t +/-10 %	Nulle

Tableau 105 : Recyclage du PEBD - Influence des paramètres

Les graphiques ci-dessous sont le résultat de 1 000 itérations de calculs combinant les variantes de modélisations en fonction de ces différents paramètres :

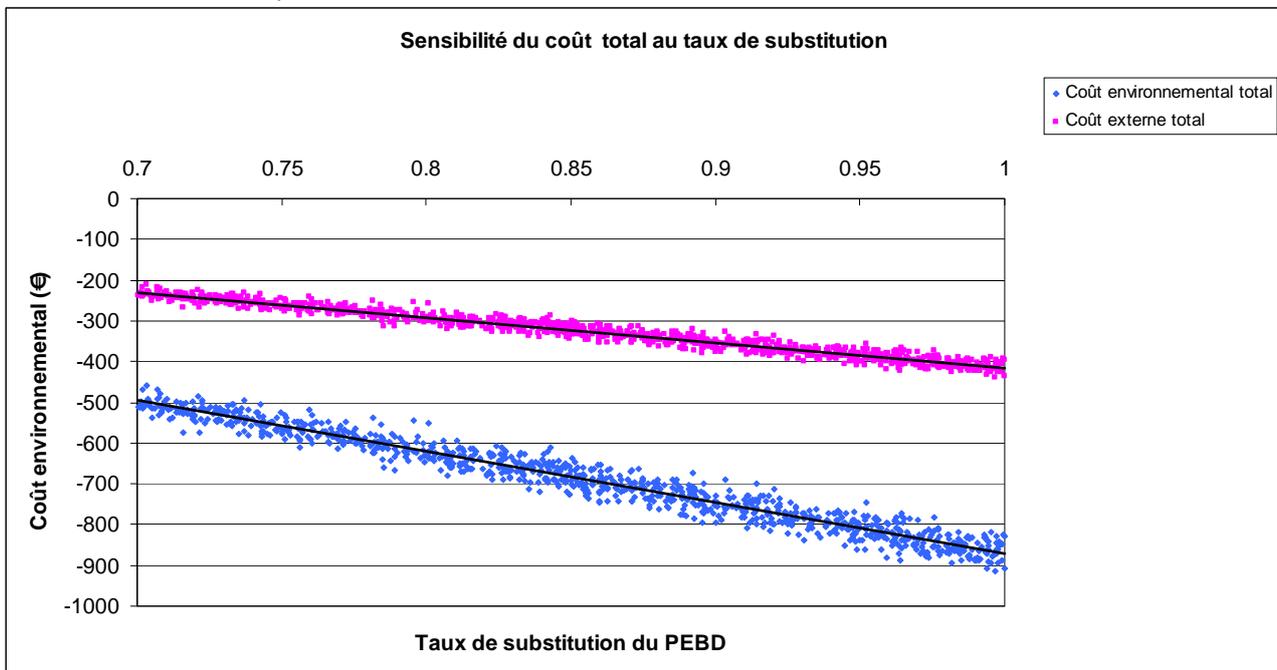


Figure 87 : Recyclage du PEBD - Sensibilité des coûts totaux en fonction du taux de substitution

Le graphe ci-dessus indique que plus le taux de substitution est élevé, plus grand est le bénéfice environnemental. L'augmentation de 10 % du taux de substitution entraîne un bénéfice environnemental de 17 % pour le coût externe total et 20 % pour le coût environnemental total.

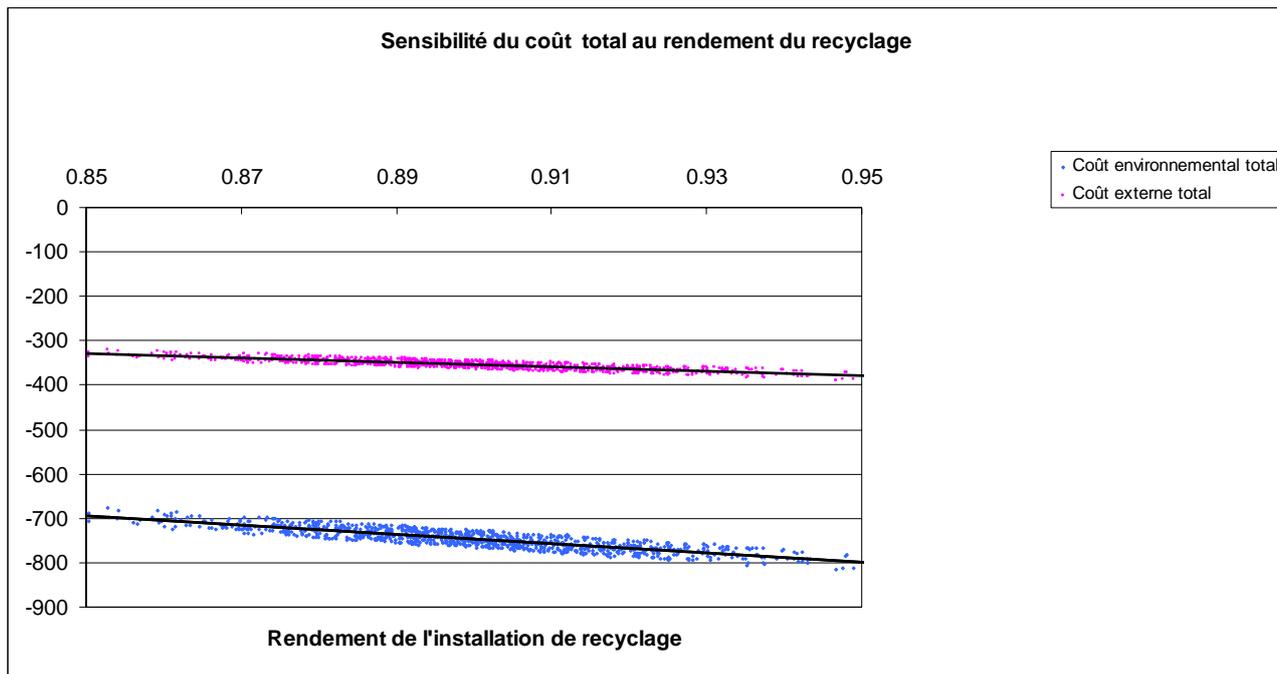


Figure 88 : Recyclage du PEBD - Sensibilité des coûts totaux en fonction de l'efficacité de recyclage

Le graphique ci-dessus indique que la sensibilité à l'efficacité de recyclage est faible. L'augmentation de l'efficacité du recyclage de 1 % génère un bénéfice environnemental de 2 %.

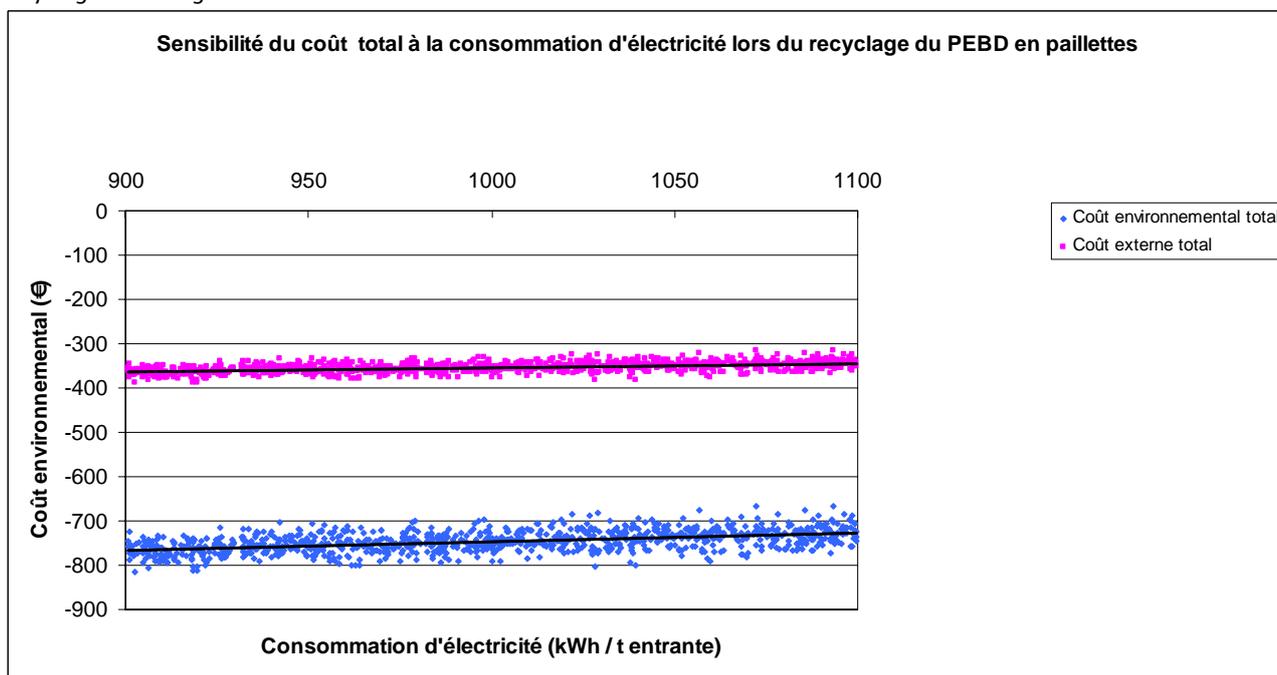


Figure 89 : Recyclage du PEBD - Sensibilité des coûts totaux en fonction de la consommation électrique lors du recyclage du PEBD

Le graphique ci-dessus indique que la sensibilité à la consommation électrique lors du recyclage est faible. L'augmentation de la consommation électrique de 100 kWh détériore l'avantage environnemental du recyclage de 2 %.

V.4.3.2 Variantes

A. Variantes liés au choix du mix électrique

Coût environnemental du recyclage d'une tonne de PET	Coût environnemental total	Coût externe
Variante mix conséquentiel	-746	-354
Variante mix moyen	-778	-372

Tableau 106 : Recyclage du PEBD - Résultats du scénario de base et de sa variante

Le tableau ci-dessus montre que dans tous les cas, le recyclage du PEBD se traduit par un bénéfice environnemental pour la société.

Les différences de coût entre les deux scénarios sont relativement faibles (4 %). Cependant cette différence est équivalente à celle pour le PEHD.

Le montant des coûts externes totaux est environ deux fois moins élevé que le montant des coûts environnementaux totaux. Ceci est principalement dû à l'internalisation des coûts de l'énergie, dont la consommation représente la plus grande partie des impacts.

B. Variantes liées à la monétarisation de la catégorie d'impact "consommation de ressources"

Ces variantes portent sur deux paramètres :

- Scénario de base :
 - Le coût environnemental lié à la consommation d'énergie se base sur un prix de 64 \$ le baril (soit une internalisation de 53 %).
 - Le facteur de monétarisation de la consommation de ressources fossiles est de 0,015 € / MJ primaire.
- Variation sur le degré d'internalisation (ne concerne que le coût externe) :
 - Le coût environnemental lié à la consommation d'énergie se base sur un prix de 100 \$ le baril
 - Le coût environnemental lié à la consommation d'énergie se base sur un prix de 150 \$ le baril
- Variation sur le facteur de monétarisation de la consommation de ressources fossiles :
 - Le facteur de monétarisation de la consommation de ressources fossiles est de 0,012 € / MJ primaire.
 - Le facteur de monétarisation de la consommation de ressources fossiles est de 0,018 € / MJ primaire.

Coût environnemental du recyclage d'une tonne de PEBD		Coût environnemental total	Coût externe		
			Prix de 64\$ le baril	Prix de 100\$ le baril	Prix de 150\$ le baril
Valeur retenue	0,015 e/MJ	-746	-354	-91	-33
Valeur basse	0,012 e/MJ	-609	-224	-33	-33
Valeur haute	0,018 e/MJ	-884	-501	-295	-33

Tableau 107 : Résultats du recyclage du PEBD selon le prix du baril de pétrole

Le tableau ci-dessus montre les mêmes tendances que celles observées avec le PET :

- la valeur du facteur de monétarisation influence fortement le coût environnemental total : la variation du coût est directement liée à celle du facteur de monétarisation, car la catégorie « consommation de ressources » est de loin la plus contributive dans le bilan environnemental du recyclage ;
- la variation du prix du baril a une incidence très forte sur le coût externe total. Pour un prix du baril de 150 \$, le prix de l'énergie est totalement internalisé, et de ce fait le coût externe est très bas et ne représente plus que le coût monétarisé des autres catégories d'impact.

C. Variantes liées à la monétarisation de la catégorie d'impact « effet de serre »

Coût environnemental du recyclage d'une tonne de PEBD		Coût environnemental total	Coût externe		
			0 % internalisation pour tous les GES	100 % internalisation CO2, 0 % pour autres GES	100 % internalisation
Objectif Kyoto	20 € / t CO2	-746	-379	-354	-347
Objectif Durabilité, valeur basse	50 € / t CO2	-794	-426	-365	-347
Objectif Durabilité, valeur haute	96 € / t CO2	-866	-498	-381	-347

Tableau 108 : Recyclage PEBD - Résultats du scénario Mix consécutif selon le degré d'internalisation des coûts des émissions de gaz à effet de serre

Le tableau ci-dessus montre que la valeur du facteur de monétarisation des gaz à effet de serre influence fortement le coût environnemental total (variation de 16 % de la valeur du coût entre l'hypothèse de 20 € / t CO2 et 96 € / t CO2) et le coût environnemental externe en cas d'internalisation nulle (situation peu probable).

Si le degré d'internalisation est fort, la valeur du facteur de monétarisation influence peu les résultats (variation maximum de 8 %).

L'internalisation des coûts de **tous** les gaz à effet de serre en plus du CO2 influence faiblement la valeur du coût environnemental externe considéré.

V.5 Recyclage de PVC provenant de châssis de fenêtre

V.5.1. Contexte

Le PVC rigide est constitué de tuyaux (dont la part de marché en Europe tend à décroître, matériaux étant de plus en plus souvent remplacé par du PEHD), de profilés, de revêtements de sols et d'emballages rigides.

Le recyclage mécanique est le recyclage le plus répandu. Un nouveau procédé, Vinyloop a vu le jour récemment et semble prometteur en termes de recyclage de déchets de PVC, y compris ceux qui ne sont pas très purs.

Les produits en PVC contiennent de nombreux additifs tels que des colorants, des plastifiants, des stabilisants. La gestion de ces différents additifs est cruciale lors du recyclage.

V.5.2. Hypothèse de modélisation

V.5.2.1 Unité fonctionnelle

L'unité fonctionnelle modélisée est le recyclage une tonne supplémentaire de châssis de fenêtre en France.

V.5.2.2 État du marché des matières secondaires

A. Introduction

Le gisement des déchets de PVC en Europe représente 1,85 millions de tonnes. Il est composé principalement de revêtements de sols, profilés dont les châssis de fenêtres, films, emballages rigides, câbles et tuyaux.

Les déchets de PVC peuvent contenir d'autres matériaux intéressants pour le recyclage. Ainsi, les câbles, qui contiennent des fils de cuivre et d'aluminium, sont très prisés par les pays asiatiques. L'organisation des collectes de ce type de déchets est faible, et actuellement ce sont principalement des chutes de production qui sont valorisées.

Différents débouchés existent pour le PVC recyclé dont les principales pour le PVC rigide sont :

- Les profilés et revêtements de sols ;
- D'autres applications diverses.

Le tableau ci-dessous récapitule la demande en PVC recyclé et les différentes applications décrites.

Produits		Tuyaux (agriculture et construction)	Revêtements de sols	Profilés (dont fenêtres)	Autres (panneaux de signalisation, mobilier urbain, membranes imperméables, murs anti-bruit,...)
Type de boucle		Fermée	Fermée	Ouverte	Ouverte
Type de déchets utilisés		Tuyaux Revêtements de sols	Revêtements de sols	Fenêtres Revêtements de sols	Câbles • Fenêtres Revêtements de sols
Part (%) du recyclé dans les produits	Actuelle	30 %	Jusqu'à 60 % dans la sous-couche.	60 à 70 %	< 30 %
	Maximale théorique	Non précisé	Jusqu'à 100% dans les revêtements bas de gamme.	Non précisé	30 %
Demande totale de produits (X1000 tonnes)	Vierge	Agriculture : 100 kt Construction : 1 700 kt	420 kt	1600 kt	200 kt
	Recyclé	20 kt	1 à 2 kt	13 à 15 kt	Membranes : 4 à 5 kt Murs anti-bruit : 1 à 2 kt Panneaux de signalisation, mobilier urbain : 28 à 30 kt Autres (terrains de sport,...) : 4 à 5 kt
Évolution probable de la demande de produits (% annuel)	Vierge	La demande de PVC est soutenue sur l'ensemble des segments du marché, en particulier en Europe de l'est et en Asie			Non précisé
	Recyclé	Demande en forte croissance			Non précisé

Tableau 109 : Présentation de l'offre et la demande de PVC recyclé pour les différentes applications

B. Situation actuelle

La demande la plus forte en PVC recyclé aujourd'hui réside dans les applications de type tuyaux. Elle représente 1 800 kilotonnes.

A l'heure actuelle, la demande en recyclé est encore faible (13 à 15 kilotonnes pour les applications type profilés, 20 à 40 kilotonnes pour des applications diverses). Cependant, cette demande est largement supérieure à l'offre. La collecte des fenêtres usagées demeure très insuffisante en tonnages et représente le facteur limitant.

En effet, la collecte du PVC est quasiment inexistante actuellement en France. Cependant, les plans de gestion des déchets de chantier et le développement des approches HQE devraient inciter, dans les années à venir, à une déconstruction sélective plus poussée.

Du fait de la longue durée de vie de ces produits, l'augmentation des collectes de forts tonnages de déchets est très lente.

C. Situation prospective

À l'avenir, les applications qui requièrent du PVC recyclé vont toutes croître du fait d'une forte demande en Europe et dans les pays émergents.

Modélisation :

→ Le PVC recyclé rigide trouvera un débouché. L'intégration du PVC-R dans des produits neufs n'est pas le facteur limitant. Les bénéfices du recyclage sont donc alloués à 100 % au système amont qui fournit la matière recyclée.

Plusieurs applications sont possibles pour le PVC recyclé et beaucoup d'entre eux connaîtront une forte croissance (voir Tableau 109). L'application dans les châssis de fenêtre présente en outre un tonnage actuel très important.

Applications possibles	Matériaux en concurrence avec la résine recyclée
Tuyaux	PVC vierge, béton, fonte
Revêtements de sols	PVC vierge, Jute, PP
Profilés dont fenêtres	PVC vierge, aluminium, bois

Tableau 110 : Présentation des matériaux en concurrence avec le PVC recyclé

Modélisation :

→ Filière sélectionnée **Le PVC recyclé sera utilisé dans la production de châssis de fenêtres en PVC.** Dans le recyclage du PVC en châssis de fenêtre, le PVC recyclé remplace du PVC vierge.

V.5.2.3 Données techniques utilisées

A. Qualité du PVC recyclé

Il est possible de fabriquer des châssis de fenêtres 100 % recyclés. Différentes raisons limitent l'utilisation de PVC recyclé dans les couches extérieures des profilés : l'exigence critique de "Résistance au vieillissement / Garantie décennale" en est la raison primordiale. De plus, la couleur grise des produits recyclés obtenus limitent l'intégration de PVC recyclé dans les produits. Ces deux raisons incitent les recycleurs à utiliser le recyclé pour le cœur du châssis (le vierge est utilisé pour l'extérieur) avec une teneur maximale de 60 à 70 %.

Le taux de substitution quant à lui peut être relativement élevé.

Modélisation :

→ Le taux de substitution considéré variera selon une distribution uniforme entre 0,7 et 0,9. (Résultats moyens avec une valeur de 0,8)

B. Procédés de recyclage

Il existe actuellement plusieurs procédés permettant le recyclage du PVC. Le recyclage mécanique est le recyclage le plus répandu. Le nouveau procédé Vinyloop semble prometteur mais la rentabilité de ce type d'installation reste à prouver. Aussi, nous retiendrons le cas d'un recyclage mécanique du PVC.

Les grandes étapes de ce recyclage sont :

- Le broyage des déchets PVC
- Si nécessaire, un tri par couleur (non pratiqué dans le cas de notre application car le PVC recyclé est utilisé pour le cœur).
- La séparation des impuretés
- L'obtention de paillettes

Le schéma ci-dessous détaille le fonctionnement d'une usine de recyclage de PVC.

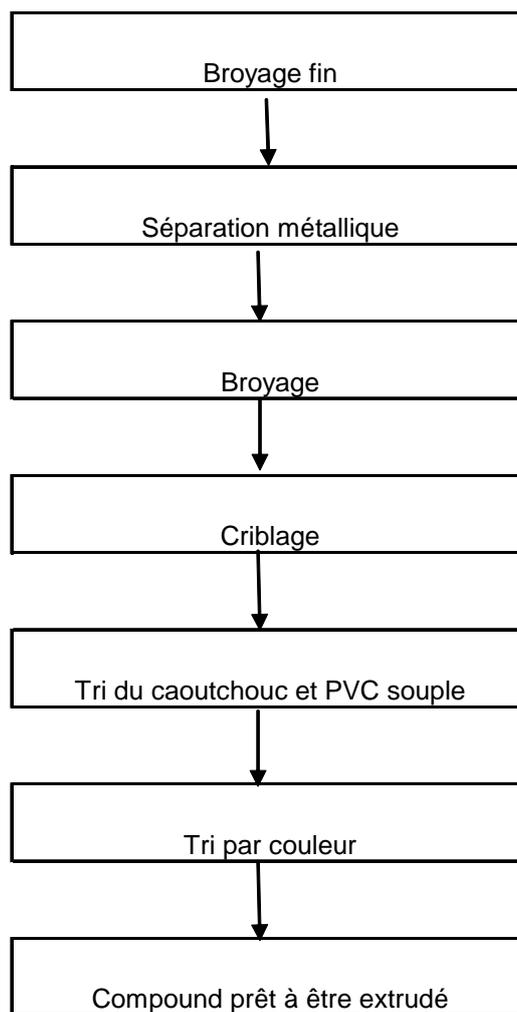


Figure 90 : Etapes du recyclage mécanique

B.1 Paillettes

Peu de données nous ont été fournies. Aussi, compte tenu des incertitudes, nous ferons varier les consommations d'électricité et d'eau comme défini dans le tableau ci-dessous :

	Électricité ⁷⁰	Eau
Données de recyclage du PVC	130 et 280 kWh	400 L +/- 10 %

Tableau 111 : Consommations du recyclage du PVC par tonnes entrantes

Le rendement d'une telle installation varie entre 95 à 98 %.

C. Production de la matière vierge

La production de PVC vierge est modélisée sous la forme d'une suspension de PVC (procédé n°1843 d'EcoInvent).

D. Production des produits finis

La fabrication de fenêtres en PVC passe par une étape d'extrusion et d'injection moulage (source : procédé EcoInvent 7148).

Ce procédé comprenant également la production des autres matériaux constituant le châssis (métaux, etc.), nous ne l'utilisons pas directement, mais nous modélisons les étapes d'injection et d'extrusion :

- Injection/moulage (procédé N° 1853) : la consommation d'électricité nécessaire à cette étape est de 1,48 kWh / kg matière à injecter
- Extrusion (procédé N° 1851). la consommation d'électricité nécessaire à cette étape est de 0,508 kWh / kg de matière à extruder

De plus une consommation électrique supplémentaire est nécessaire pour réaliser le châssis de fenêtre.

V.5.3. Résultats

Le modèle correspondant à la décision de recycler une tonne supplémentaire de PVC se décompose en plusieurs étapes ou phases.

Elles correspondent soit à des effets engendrés par la décision (et comptabilisés positivement) soit à des effets évités. Elles sont décrites dans le tableau ci-dessous :

Phases	Etapes considérées
Recyclage du PVC	Recyclage matériau (Recyclage PVC)
	Recyclage – application (Fabrication du châssis PVC recyclé)
	Recyclage – transport (Transport centre de tri-recycleur et recycleur-application)
Production évitée	Production évitée – matériau (Fabrication de paillettes de PVC vierge)
	Production évitée – application (Fabrication de châssis en PVC vierge)
	Production évitée – Transport (transport du producteur de matière vierge à l'application) ⁷¹
Fin de vie évitée	Élimination en CSDU et/ou incinérateur évitée grâce au recyclage

Tableau 112 : Recyclage du PVC - Description des phases

⁷⁰ Source : d'après des visites de différents recycleurs en Europe, 2008, RDC Environment.

⁷¹ Le transport des matières premières pour la production du PVC vierge est contenu dans la phase « Production évitée-matériau ». L'accès à ces données n'était pas possible (données agrégées).

V.5.3.1 Scénario de base

Rappel :

Les résultats sont exprimés en € 2007 par unité fonctionnelle
Ils donnent le coût environnemental total et le coût externe total.

Une valeur positive indique un coût pour la société et une valeur négative indique un bénéfice pour la société.

Le scénario de base retient les hypothèses suivantes :

- Approche conséquentielle pour la production d'électricité
- Facteur de monétarisation de la consommation de ressource : 0,015 € / MJ primaire
- Facteur de monétarisation des gaz à effet de serre équivalent à l'objectif de Kyoto (20 € / t CO2)
- Calcul du coût externe : Taux d'internalisation des coûts de la ressource de 53 % (correspond à un prix de 64 \$ le baril)
- Taux d'internalisation des coûts des émissions de gaz à effet de serre de 100 % pour le CO2 et 0 % pour les autres gaz à effet de serre.

A. Bilan par phase

- Coût environnemental total

Le bénéfice environnemental total moyen est de 632 € / t PVC recyclé (coût négatif).

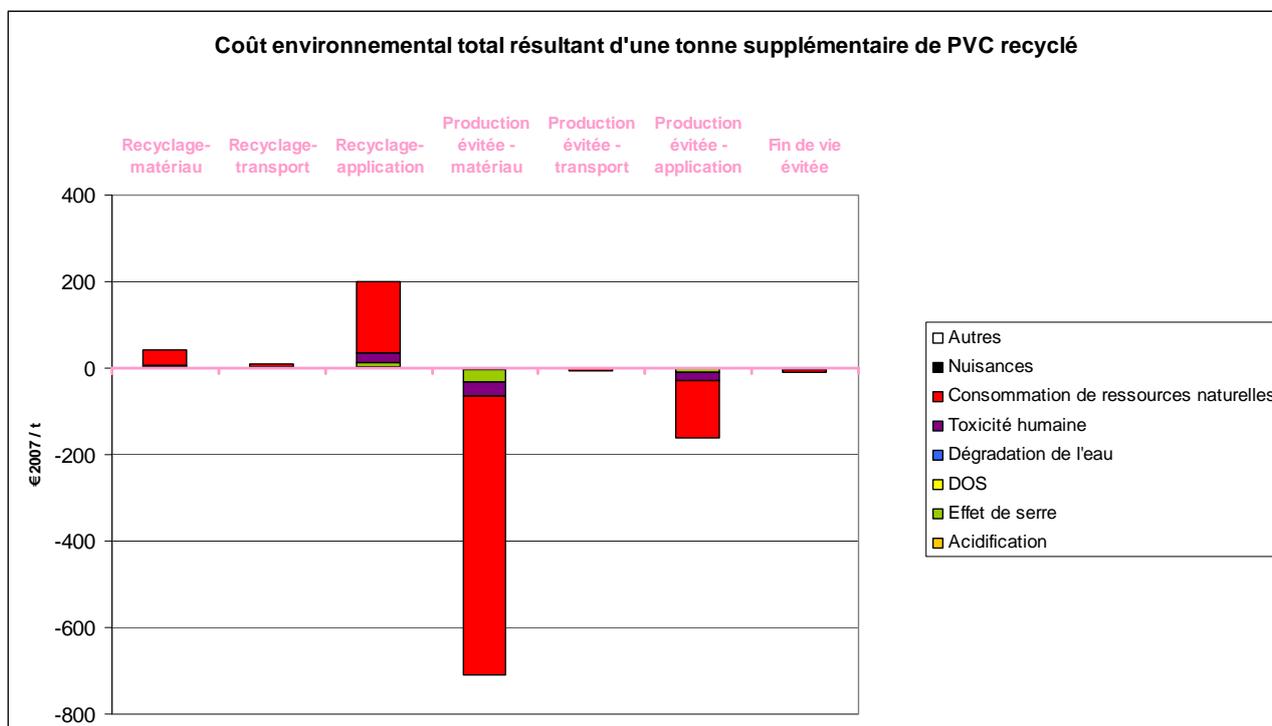


Figure 91 : Recyclage PVC – Coût environnemental total - Résultats par phase

Phases	Acidification	Effet de serre	DOS	Dégradation de l'eau	Toxicité humaine	Consommation de ressources naturelles	Nuisances	Autres	Coût environnemental total
Recyclage-matériau	0	3	0	0	4	35	0	0	42
Recyclage-transport	0	1	0	0	1	8	0	0	10
Recyclage-application	2	11	0	1	22	165	0	0	201
Production évitée - matériau	-3	-30	0	0	-33	-644	0	0	-710
Production évitée - transport	0	0	0	0	-1	-5	0	0	-6
Production évitée - application	-1	-9	0	-1	-18	-131	0	0	-160
Fin de vie évitée	0	-1	0	-1	-1	-5	0	0	-8
Total	-2	-26	0	-1	-25	-578	0	0	-632

Phases	Acidification	Effet de serre	DOS	Dégradation de l'eau	Toxicité humaine	Consommation de ressources naturelles	Nuisances	Autres	Coût environnemental total
Recyclage-matériau	0%	0%	0%	0%	1%	5%	0%	0%	7%
Recyclage-transport	0%	0%	0%	0%	0%	1%	0%	0%	2%
Recyclage-application	0%	2%	0%	0%	4%	26%	0%	0%	32%
Production évitée - matériau	0%	5%	0%	0%	5%	102%	0%	0%	112%
Production évitée - transport	0%	0%	0%	0%	0%	1%	0%	0%	1%
Production évitée - application	0%	1%	0%	0%	3%	21%	0%	0%	25%
Fin de vie évitée	0%	0%	0%	0%	0%	1%	0%	0%	1%
Total	0%	4%	0%	0%	4%	91%	0%	0%	100%

Légende

	> 50 %
	20-50 %
	10-20 %
	6-10 %
	3-5%
	< 3 %

Tableau 113 : Recyclage PVC – Coût environnemental total - Résultats chiffrés (en valeur absolue)⁷²

⁷² Les pourcentages sont calculés par rapport au coût total, en valeur absolue. Dès lors, les contributions relatives peuvent être supérieures à 100%.

Le graphique et les tableaux ci-dessus montrent que les phases qui coûtent d'un point de vue environnemental sont, par ordre d'importance :

- le recyclage du PVC dans son application (= production du châssis à partir de PVC recyclé) (32 %) ;
- le recyclage du PVC (7 %) ;
- la fin de vie évitée (1 %) : cette fin de vie évitée représente peu de bénéfice car on fait l'hypothèse que le PVC est mis en décharge à 100 %.

Note : On remarque que contrairement aux plastiques étudiés précédemment, au sein du recyclage, l'impact environnemental de la phase d'application (production du produit) est supérieur à celui de la phase du recyclage du matériau (broyage, tri, extrusion).

A l'inverse, les phases qui génèrent des bénéfices sont les phases de production évitée (production de PVC vierge 112 %, fabrication du châssis 25 %).

La différence entre la phase "recyclage – application" et "production évitée – application" est due au taux de substitution inférieur à 1 : Il faut plus de matière pour produire un châssis avec le PVC recyclé qu'avec le vierge. La production de châssis à partir de recyclé est donc plus impactante.

Les transports pèsent seulement pour 3 % des impacts environnementaux.

La production évitée (matériau + application) génère la majeure partie du bénéfice environnemental.

Les gains environnementaux totaux représentent 4 fois les coûts environnementaux liés au recyclage.

• **Coût externe total**

Le bénéfice environnemental externe moyen est de 300 € / tonne de PVC recyclé.

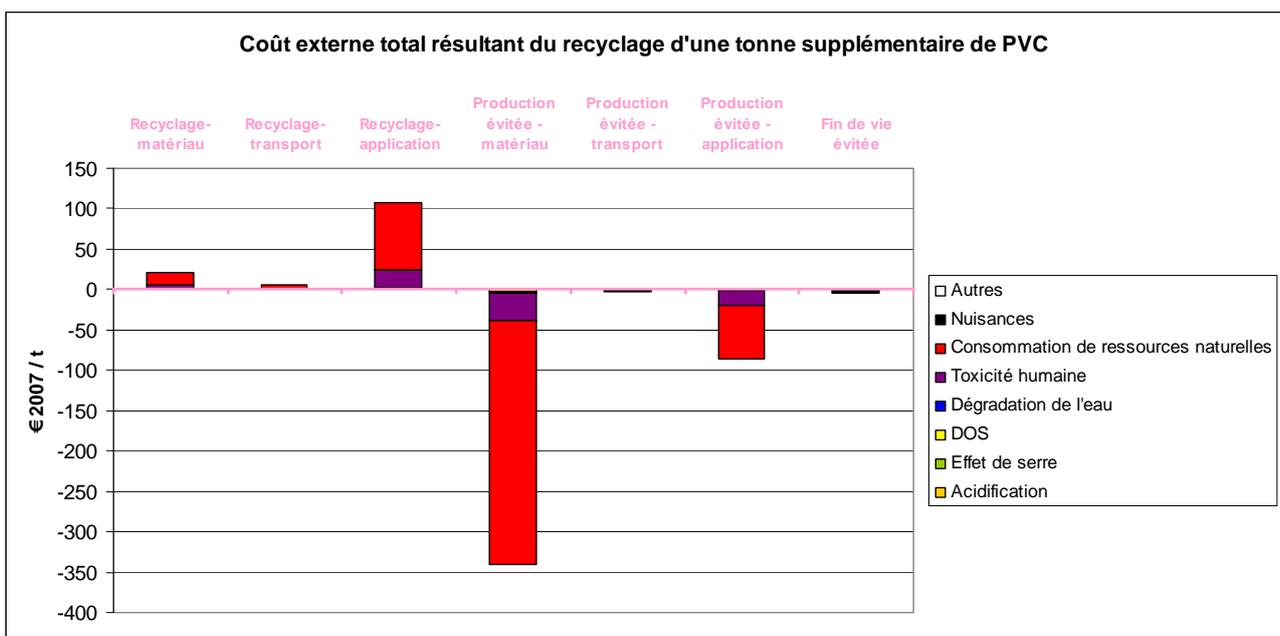


Figure 92 : Recyclage PVC – Coût externe total - Résultats par phase

Phases	Acidification	Effet de serre	DOS	Dégradation de l'eau	Toxicité humaine	Consommation de ressources naturelles	Nuisances	Autres	Coût environnemental total
Recyclage-matériau	0	0	0	0	4	16	0	0	21
Recyclage-transport	0	0	0	0	1	4	0	0	5
Recyclage-application	2	1	0	0	22	83	0	0	107
Production évitée - matériau	-3	-2	0	0	-33	-302	0	0	-340
Production évitée - transport	0	0	0	0	-1	-2	0	0	-3
Production évitée - application	-1	-1	0	0	-18	-66	0	0	-86
Fin de vie évitée	0	-1	0	0	-1	-2	0	0	-4
Total	-2	-2	0	0	-25	-270	0	0	-300

Phases	Acidification	Effet de serre	DOS	Dégradation de l'eau	Toxicité humaine	Consommation de ressource	Nuisances	Autres	Coût externe total
Recyclage-matériau	0%	0%	0%	0%	1%	5%	0%	0%	7%
Recyclage-transport	0%	0%	0%	0%	0%	1%	0%	0%	2%
Recyclage-application	1%	0%	0%	0%	7%	28%	0%	0%	36%
Production évitée - matériau	1%	1%	0%	0%	11%	101%	0%	0%	114%
Production évitée - transport	0%	0%	0%	0%	0%	1%	0%	0%	1%
Production évitée - application	0%	0%	0%	0%	6%	22%	0%	0%	29%
Fin de vie évitée	0%	0%	0%	0%	0%	1%	0%	0%	1%
Total	1%	1%	0%	0%	8%	90%	0%	0%	100%

Légende

	> 50 %
	20-50 %
	10-20 %
	6-10 %
	3-5 %
	< 3 %

Tableau 114 : Recyclage PVC – Coût externe total -Résultats chiffrés (en valeur absolue) ⁷³

⁷³ Les pourcentages sont calculés par rapport au coût total, en valeur absolue. Dès lors, les contributions relatives peuvent être supérieures à 100%.

Les résultats présentés ci-dessus confirment les résultats précédents en termes de tendance.

En revanche en termes de valeur absolue, les valeurs sont divisées par 2 par rapport aux coûts environnementaux totaux car le coût de l'énergie et de l'effet de serre ont été internalisés en grande partie.

Les économies de matière vierge impactent favorablement le bilan environnemental au travers des catégories d'impact des consommations de ressources fossiles et effet de serre et dans une moindre mesure de la toxicité humaine. La part de la toxicité humaine devient plus importante, car aucun coût lié à cet impact n'est internalisé.

B. Analyse de sensibilité

Le tableau ci-dessous indique l'influence d'une variation réaliste des paramètres du modèle sur les résultats :

Paramètre	Intervalle de valeur	Influence
Taux de substitution	0,7-0,9	Forte
Efficacité de recyclage (rendement)	0,95-0,98	Moyenne
Consommation d'électricité pour le recyclage du PVC	130-280 kWh / t	Faible
Distance entre le centre de tri et le recycleur	200-600 km	Très faible
Distance entre le recycleur et le fabricant de bouteille	200-1100 km	Très faible
Consommation d'eau pour le recyclage du PVC	400 L/t +/-10 %	Nulle

Tableau 115 : Influence des paramètres

Les graphiques ci-dessous sont le résultat de 1 000 itérations de calcul combinant les variantes de modélisation en fonction de ces différents paramètres.

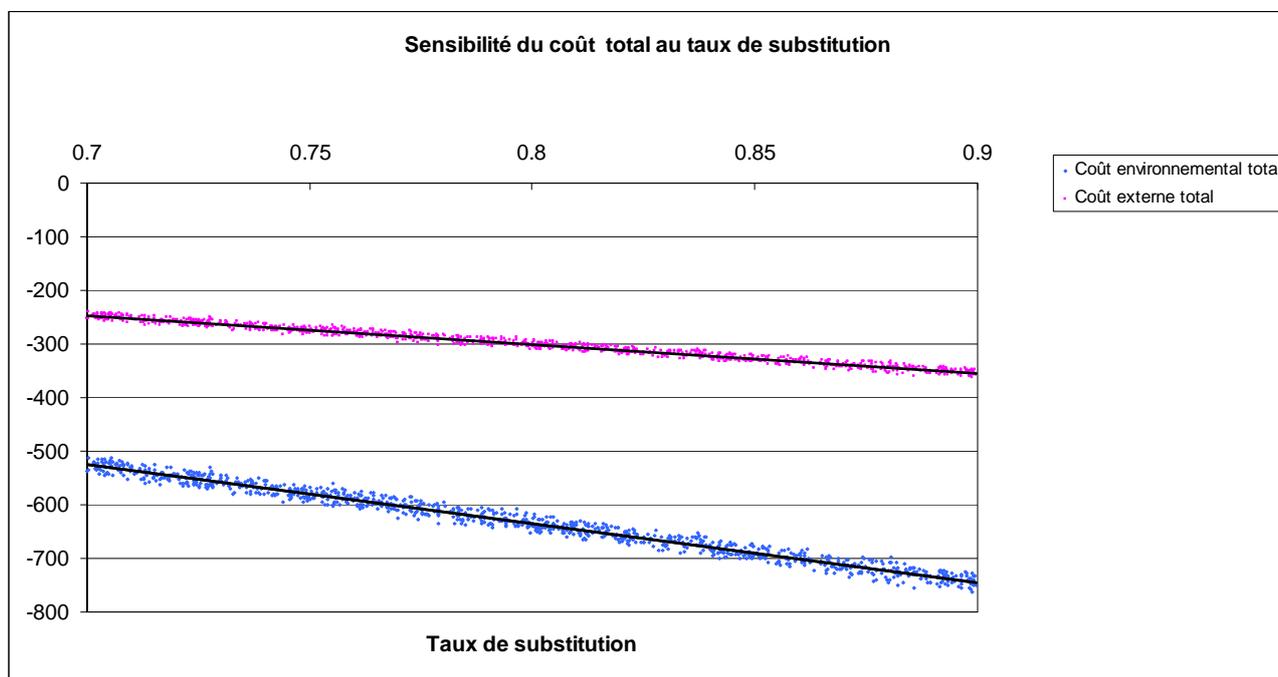


Figure 93 : Recyclage PVC - Sensibilité des coûts totaux en fonction du taux de substitution

Le graphe ci-dessus indique que plus le taux de substitution est élevé, plus grand est le bénéfice environnemental. L'augmentation de 10 % du taux de substitution entraîne un bénéfice environnemental de 15 % pour le coût externe total et comme pour le coût environnemental total.

Le resserrement des points autour de la droite de tendance indique que le taux de substitution est le paramètre le plus influant.

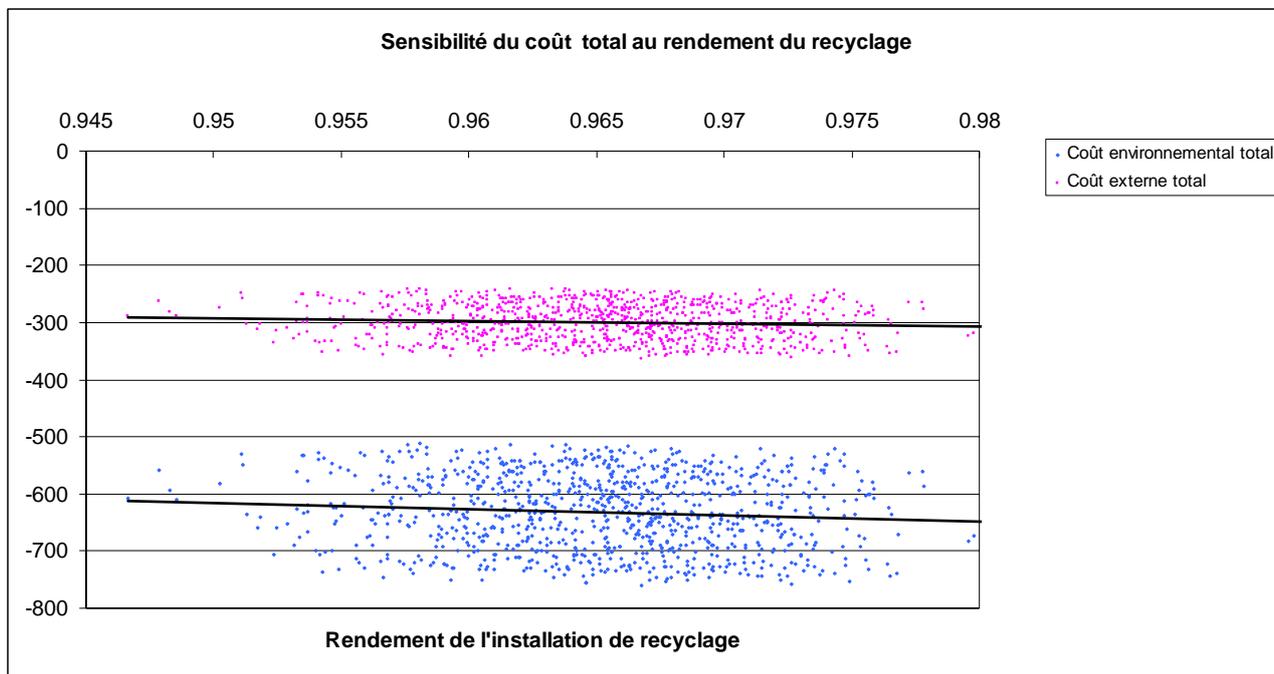


Figure 94 : Recyclage PVC - Sensibilité des coûts totaux en fonction de l'efficacité de recyclage

Le graphique ci-dessus indique que la sensibilité à l'efficacité de recyclage est moyenne : l'augmentation du rendement de recyclage de 1 % entraîne une augmentation du bénéfice environnemental d'environ 2 %.

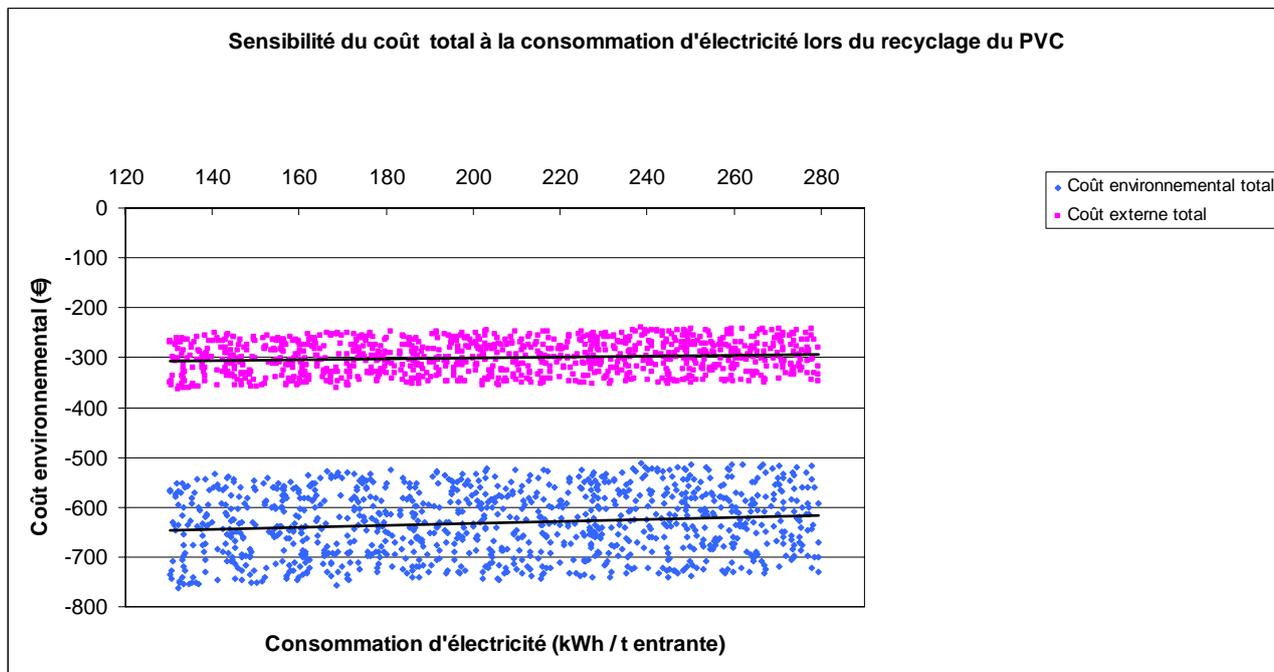


Figure 95 : Sensibilité des coûts totaux en fonction de la consommation électrique lors du recyclage du PVC

Le graphique ci-dessus indique que la sensibilité à la consommation électrique lors du recyclage est faible : la pente de la droite est très faible et les points sont très dispersés autour de cette droite.

V.5.3.2 Variantes

A. Variantes liés au choix du mix électrique

Le scénario de base considère le mix électrique conséquentiel et la variante le mix moyen (voir V.1.3.2 et V.1.3.3).

Coût environnemental du recyclage d'une tonne de PVC	Coût environnemental total	Coût externe
Variante mix conséquentiel	-632	-300
Variante mix moyen	-642	-305

Tableau 116 : Recyclage PVC - Résultats du scénario de base et de sa variante

Le tableau ci-dessus montre que dans tous les cas, le recyclage du PVC se traduit par un bénéfice environnemental pour la société.

Les différences de coût entre les deux scénarios sont très faibles (1 %). En effet, les deux mix reposent entièrement sur l'énergie fossile et nucléaire, ce qui engendre un impact identique pour la catégorie d'impacts consommation des ressources naturelles (plus grosse contributrice au bilan environnemental).

B. Variantes liées à la monétarisation de la catégorie d'impact "consommation de ressources"

Ces variantes portent sur deux paramètres :

- Scénario de base :
 - Le coût environnemental internalisé de la consommation d'énergie se base sur un prix de 64 \$ le baril (soit une internalisation de 53 %).
 - Le facteur de monétarisation de la consommation de ressources fossiles est de 0,015 € / MJ primaire.
- Variation sur le facteur de monétarisation de la consommation de ressources fossiles :
 - Le facteur de monétarisation de la consommation de ressources fossiles est de 0,012 € / MJ primaire.
 - Le facteur de monétarisation de la consommation de ressources fossiles est de 0,018 € / MJ primaire.
- Variation sur le degré d'internalisation (ne concerne que le coût externe) :
 - Le coût environnemental internalisé de la consommation d'énergie se base sur un prix de 100 \$ le baril
 - Le coût environnemental internalisé de la consommation d'énergie se base sur un prix de 150 \$ le baril

Coût environnemental du recyclage d'une tonne de PVC		Coût environnemental total	Coût externe		
			Prix de 64\$ le baril	Prix de 100\$ le baril	Prix de 150\$ le baril
Valeur retenue	0,015 e/MJ	-632	-300	-78	-29
Valeur basse	0,012 e/MJ	-516	-190	-29	-29
Valeur haute	0,018 e/MJ	-747	-422	-250	-29

Tableau 117 : Résultats du recyclage du PVC selon le prix du baril de pétrole

Le tableau ci-dessus montre les mêmes tendances que celles observées avec les plastiques précédents :

- La valeur du facteur de monétarisation influence fortement le coût environnemental total : la variation du coût est directement liée à celle du facteur de monétarisation, car la catégorie « consommation de ressources » est de loin la plus contributive dans le bilan environnemental du recyclage ;
- La variation du prix du baril a une incidence très forte sur le coût externe total. Pour un prix du baril de 150 \$, le prix de l'énergie est totalement internalisé, et de ce fait le coût externe est très bas car il ne représente plus que le coût monétarisé des autres catégories d'impact.

C. Variantes liées à la monétarisation de la catégorie d'impact « effet de serre »

Comme pour la catégorie "consommation des ressources naturelles", les variantes portent sur le facteur de monétarisation et sur le degré d'internalisation.

Coût environnemental du recyclage d'une tonne de PVC		Coût environnemental total	Coût externe		
			0 % internalisation pour tous les GES	100 % internalisation CO2, 0 % pour autres GES	100 % internalisation
Objectif Kyoto	20 € / t CO2	-632	-323	-300	-297
Objectif Durabilité, valeur basse	50 € / t CO2	-671	-362	-303	-297
Objectif Durabilité, valeur haute	96 € / t CO2	-731	-422	-309	-297

Tableau 118 : Recyclage PVC - Résultats du scénario Mix consécutif selon le degré d'internalisation des coûts des émissions de gaz à effet de serre

Le tableau ci-dessus montre que la valeur du facteur de monétarisation des gaz à effet de serre influence fortement le coût environnemental total (variation de 15 % de la valeur du coût entre l'hypothèse de 20 € / t CO2 et 96 € / t CO2) et le coût environnemental externe en cas d'internalisation nulle (situation peu probable).

L'internalisation des coûts de **tous** les gaz à effet de serre en plus du CO2, au lieu du CO2 uniquement n'engendre qu'une faible diminution du bénéfice environnemental externe car c'est le CO2 qui est le plus gros contributeur de l'effet de serre. *A contrario*, le passage d'une internalisation du CO2 seul à une internalisation nulle engendre une augmentation sensible du bénéfice environnemental.

V.6 Recyclage de PS provenant d'emballages thermo-formés

V.6.1. Contexte

La plupart des déchets de corps creux thermoformés en PS sont aujourd'hui collectés en mélange avec les déchets ménagers. Depuis quelques années, de nombreuses expériences de collecte ont été tentées (gobelets, pots de yaourts et autres produits laitiers frais, barquettes de margarine) en particulier en Grande-Bretagne, aux Pays-Bas, en Allemagne et en Suisse, mais avec peu de succès à ce jour. Ces collectes ne représentent toutefois que des quantités extrêmement limitées.

V.6.2. Hypothèse de modélisation

V.6.2.1 Unité fonctionnelle

L'unité fonctionnelle modélisée est le recyclage une tonne supplémentaire de polystyrène d'emballage thermoformé en France.

V.6.2.2 État du marché des matières secondaires

A. Introduction

Le gisement global annuel de déchets s'élève à environ 1 100 kilotonnes (pots, gobelets, plateaux souples). Une faible fraction de ce gisement est recyclée : de l'ordre de 30 kilotonnes / an au maximum, en Europe des 27.

Les principaux débouchés du PS recyclé sont constitués :

- de produits moulés par injection pour des objets domestiques tels que des étagères, plateaux, cassettes vidéo ou audio, boîtier de CD, cintres, pots pour l'horticulture... Ce marché présente des débouchés assez porteurs à moyen-terme.
- de produits extrudés en plaques tels que la couche intermédiaire des emballages pour les œufs.

Pour les applications moulées et thermoformées, il n'y a pas d'obstacle technique à l'incorporation de recyclé en mélange avec du vierge jusqu'à une proportion de 30 à 50 %.

Quelques applications existent également dans l'automobile.

Il n'existe pas d'applications avec contact alimentaire. Pour les usages avec contact alimentaire (recyclage en boucle fermée), le PS recyclé est utilisable en tant que couche intermédiaire dans des produits multi-couches co-injectés (ex : gobelets à café contenant 25 à 30 % de recyclé).

B. Situation actuelle

La demande la plus forte en PS recyclé aujourd'hui réside dans les applications de type mobilier. Elle représente toutefois de faibles tonnages.

Cependant, cette demande est supérieure à l'offre. La collecte des déchets d'emballages thermoformés est inexistante en France, elle représente donc le facteur limitant.

C. Situation prospective

Il est difficile d'identifier l'évolution des marchés, mais à moyen terme les débouchés actuels devraient rester porteurs et ne pas être concurrencés par d'autres applications.

Modélisation :

→ Le PS recyclé trouvera un débouché. L'intégration du PS dans des produits neufs n'est pas le facteur limitant. Les bénéfices du recyclage sont donc alloués à 100 % au système amont qui fournit la matière recyclée.

Applications possibles	Matériaux en concurrence avec la résine recyclée
Mobilier	Panneaux de particules en bois
Cassettes video...	PC, mix plastiques

Tableau 119 : Présentation des matériaux en concurrence avec le PS recyclé

Modélisation :

→ Filière sélectionnée : Le PS recyclé sera utilisé dans la production de mobilier. Le matériau auquel se substitue le PS recyclé sera le panneau de particules en bois. Sa substitution s'effectue à raison de 1 volume de PS pour 1 volume de bois.

Nous avons deux taux de substitution :

- Lorsque l'on raisonne en volume de bois : 1 → Production de panneaux en bois et utilisation alternative du bois
- Lorsque l'on raisonne en poids de bois : de 0,5 à 0,8 en fonction de la densité du bois (il s'agit du ratio entre la densité du bois et celle du PS) → Fin de vie évitée du bois

Note : Pour le PS recyclé, il n'y a pas d'application privilégiée qui se dégage. Les applications possibles engendrent en outre des substitutions de matériaux très variables. Le choix du panneau de particules a été pris comme un exemple intéressant car il présente une substitution différente des autres plastiques (la fibre recyclée ne remplace pas la fibre vierge), mais ne constitue pas le cas de figure le plus probable (celui-ci n'ayant pas été identifié).

V.6.2.3 Données techniques utilisées

A. Qualité

Les applications dans lesquelles est recyclé de PS thermoformé sont des applications de faible qualité. Le PS remplace alors la matière vierge sur la base de 1 volume pour 1 volume de vierge.

Modélisation :

→ Le taux de substitution sera entre 0,5 et 0,8 (soit le rapport entre la densité des panneaux (de 0,5 à 0,8) et celle du PS (1,04)).

B. Procédés de recyclage

Le procédé de recyclage considéré consiste en un broyage et lavage.

Faute de données fournies par les recycleurs, nous nous sommes basées sur les hypothèses suivantes⁷⁴ :

	Électricité	Eau
Recyclage PS	670 kWh	30 L

Tableau 120 : Consommations du recyclage du PS en tonnes entrantes

Compte-tenu des incertitudes sur ces valeurs, nous ferons varier ces données de +/-10 %.

Le rendement de recyclage considéré est de 85 % en moyenne (+/-5 %).

⁷⁴ Source : d'après des visites de différents recycleurs en Europe, 2008, RDC Environnement.

C. Production de la matière vierge et du produit fini

La production du panneau de bois est modélisée par le procédé Ecolvent N° 2482 (*particle board, indoor use*).

Compte tenu de l'utilisation de bois pour réaliser un panneau de particule, nous modéliserons, comme dans le cas du recyclage des papiers cartons, l'utilisation du bois selon 3 scénarios :

- Scénario 1 : Cas de la ressource « illimitée » où le fait d'utiliser ou non du bois n'a pas d'incidence environnementale
- Scénario 2a : Concurrence pour l'accès à la ressource bois et énergies renouvelables compétitives par rapport aux énergies fossiles. Le bois non consommé est utilisé afin de produire de la chaleur. Puisque le volume d'énergie produite à partir d'ENR n'est pas fixe, la chaleur produite à partir du bois se substitue à une production de chaleur à base d'**énergie fossile**.
- Scénario 2b : Concurrence pour l'accès à la ressource bois et ENR non compétitives par rapport aux énergies fossiles. Le bois non consommé est utilisé afin de produire de l'énergie. Le volume d'énergie renouvelable est fixé par les politiques et l'énergie produite à partir du bois disponible se substitue à de l'énergie qui aurait été produite à partir d'une autre **source renouvelable** (éolien, solaire, ...)

V.6.3. Résultats

Le modèle correspondant à la décision de recycler une tonne supplémentaire de PS se décompose en plusieurs étapes ou phases.

Elles correspondent soit à des effets engendrés par la décision (et comptabilisés positivement) soit à des effets évités. Elles sont décrites dans le tableau ci-dessous :

Phases	Étapes considérées
Recyclage du PS	Recyclage – matériau (Recyclage PS)
	Recyclage – application (injection de PS recyclé)
	Recyclage – transport (Transport centre de tri-recycleur et recycleur-application)
Production évitée	Production évitée – matériau et application (Fabrication panneau de particules) ⁷⁵
	Production évitée – utilisation alternative du bois (cas des scénarios 2a et 2b)
Fin de vie évitée	Élimination en CSDU et/ou incinérateur évitée grâce au recyclage

Tableau 121 : Recyclage du PS - Description des phases

V.6.3.1 Scénario de base

Rappel :

Les résultats sont exprimés en € 2007 par unité fonctionnelle

Ils donnent le coût environnemental total et le coût externe total.

Une valeur positive indique un coût pour la société et une valeur négative indique un bénéfice pour la société.

Le scénario de base retient les hypothèses suivantes :

- Approche conséquentielle pour la production d'électricité
- Facteur de monétarisation de la consommation de ressource : 0,015 € / MJ primaire
- Facteur de monétarisation des gaz à effet de serre équivalent à l'objectif de Kyoto (20 € / t CO2)
- Calcul du coût externe : Taux d'internalisation des coûts de la ressource de 53 % (correspond à un prix de 64 \$ le baril)

⁷⁵ Cette phase intègre donc l'extraction du bois, sa transformation en panneau de particules et les transports afférents.

- Taux d'internalisation des coûts des émissions de gaz à effet de serre de 100 % pour le CO2 et 0 % pour les autres gaz à effet de serre.

A. Bilan par phase

- **Coût environnemental total**

Le coût environnemental total moyen est de :

- 278 € / t PS recyclé dans le cas du scénario 1 « ressource bois illimitée »
- 131 € / t PS recyclé dans le cas du scénario 2a « compétition avec énergie fossile »
- 306 € / t PS recyclé dans le cas du scénario 2b « compétition avec ENR »

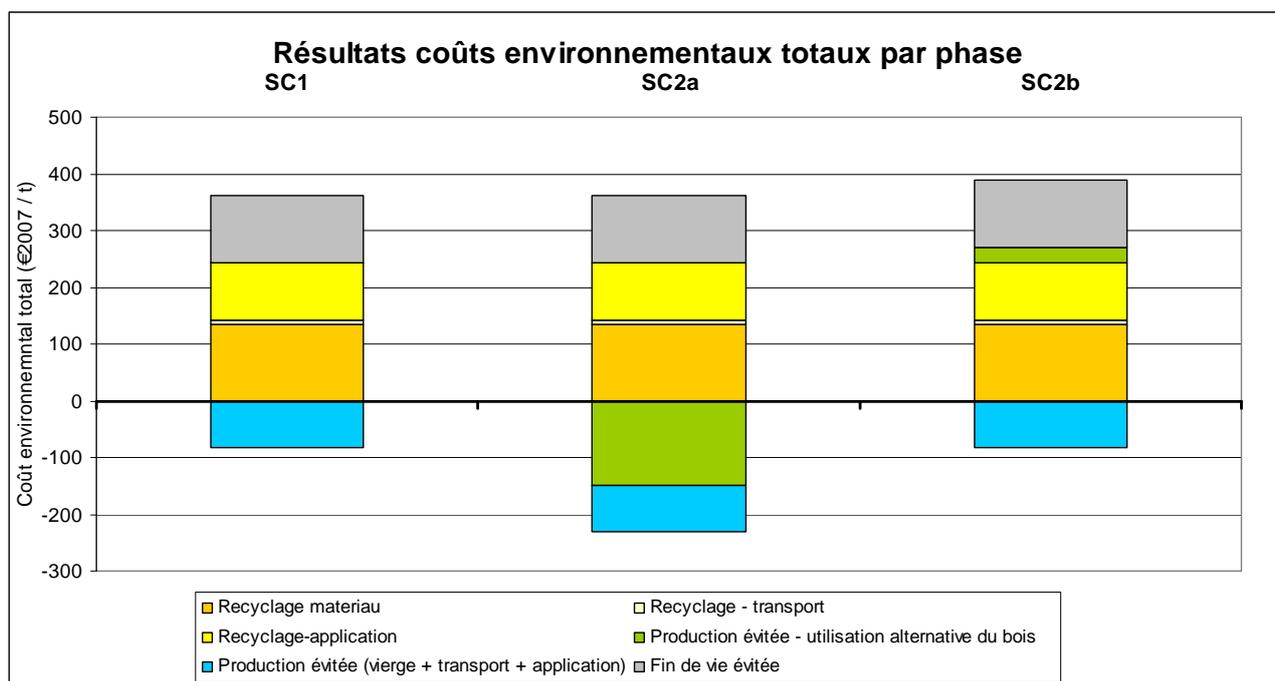


Figure 96 : Recyclage PS – Coût environnemental total - Résultats par phase

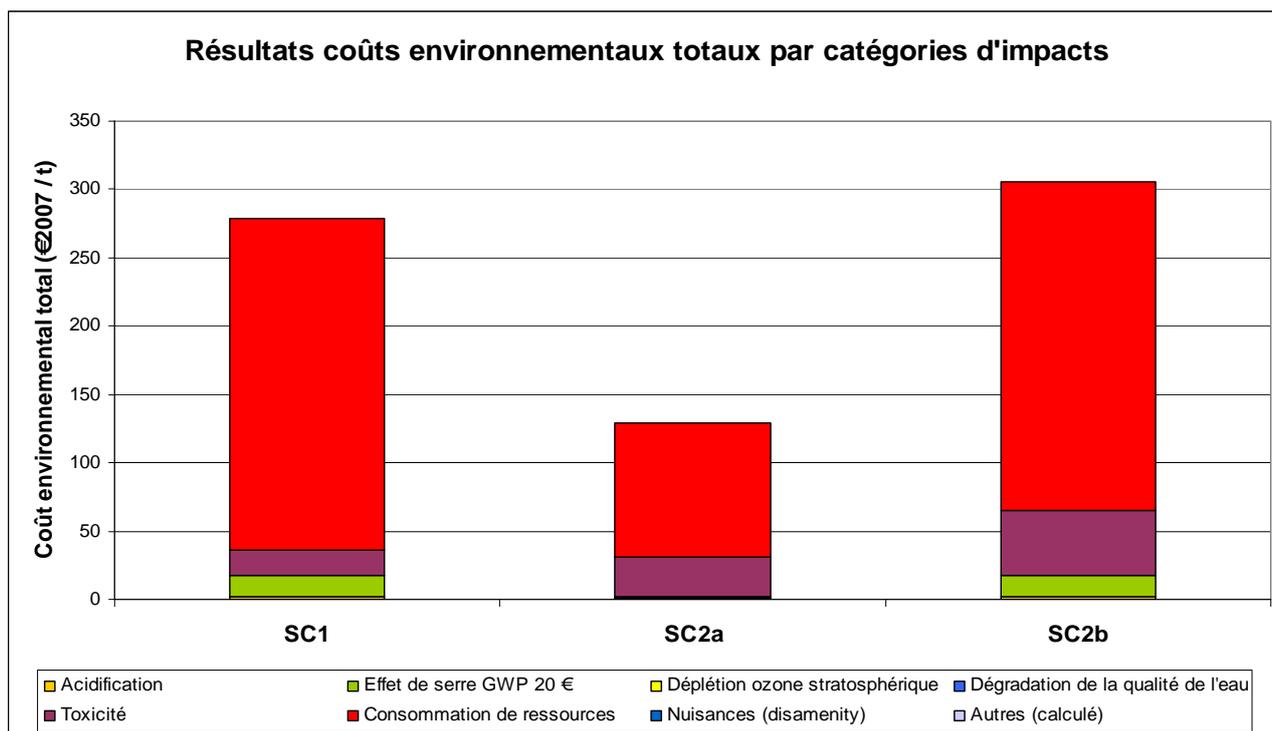


Figure 97 : Recyclage PS – Coût environnemental total - Résultats par catégorie d'impacts

	SC1	SC2a	SC2b
Recyclage materiau	133	133	133
Recyclage - transport	7	7	7
Recyclage-application	102	102	102
Production évitée - utilisation alternative du bois	0	-149	28
Production évitée (vierge + transport + application)	-83	-81	-83
Fin de vie évitée	118	118	118
TOTAL	278	131	306

	SC1	SC2a	SC2b
Recyclage materiau	48%	102%	44%
Recyclage - transport	3%	6%	2%
Recyclage-application	37%	78%	33%
Production évitée - utilisation alternative du bois	0%	-114%	9%
Production évitée (vierge + transport + application)	-30%	-62%	-27%
Fin de vie évitée	42%	90%	39%
TOTAL	100%	100%	100%

	Acidification	Effet de serre GWP 20 €	Déplétion ozone stratosphérique	Dégradation de la qualité de l'eau	Toxicité	Consommation de ressources	Nuisances (disamenity)	Autres (calculé)	TOTAL
SC1	2	15	0	1	18	242	0	0	278
SC2a	1	1	0	1	29	99	0	0	131
SC2b	2	15	0	1	47	241	0	0	306

Tableau 122 : Recyclage PS – Coût environnemental total - Résultats chiffrés

Les graphiques et les tableaux ci-dessus montrent que le recyclage du polystyrène, **dans une application de type mobilier avec substitution de bois**, génère un bilan environnemental global négatif (il ne présente pas de bénéfice environnemental).

Ceci est lié au fait que les impacts du recyclage et de la fin de vie évitée ne sont pas compensés par la production évitée, en l'occurrence la production de panneaux de **bois**.

Note : pour rappel, dans les autres cas de figure, on considèrerait que le matériau auquel se substituait la matière recyclée était le matériau vierge correspondant, dont la production évitée compensait largement les impacts du procédé de recyclage.

Les phases qui génèrent des impacts environnementaux sont le recyclage du matériau (environ 40 % du coût pour les scénarios 1 et 2b, et 102 % pour le scénario 2a), la fin de vie évitée (environ 40 % dans le scénario 1 et 2b et 90 % dans le scénario 2a) et enfin le recyclage dans son application (production d'un meuble en PS recyclé).

Les catégories d'impacts qui contribuent le plus au coût environnemental sont les consommations de ressources (75 à 80 %), la toxicité (6 à 15 %) et dans une moindre mesure l'effet de serre (5 %).

Note : par rapport aux plastiques étudiés précédemment, la consommation de ressources est moins fortement contributive (pour les autres plastiques, elle représentait au moins 90 % du coût environnemental total).

Le scénario 2a présente un coût environnemental inférieur à celui du scénario 1. Cela est lié à la prise en compte de la ressource bois. Grâce au recyclage de PS en mobilier, on évite de produire du bois. Ce bois est donc disponible pour alimenter des chaudières bois, qui permettent de réaliser une économie de ressources fossiles. Cette économie de ressources fossiles représente un bénéfice environnemental de 149 € / t de PS recyclé. Mais celui-ci ne compense pas les impacts des autres phases. Ce scénario permet également d'éviter des émissions de CO₂ (14 € / t). C'est pourquoi la catégorie effet de serre dans le cadre du scénario 2 a est nettement moins contributive au coût environnemental total que dans le cas du scénario 1.

Dans le cas du scénario 2b, l'utilisation de bois plutôt que d'autres sources d'ENR engendre des impacts environnementaux, principalement dans la catégorie d'impacts toxicité. Cet impact en terme de toxicité représente un coût environnemental de 47 € / t PS recyclé, soit environ 30 € / t de plus que dans le cas du scénario 1.

- **Coût externe total**

Le bénéfice environnemental externe moyen est de :

- 162 € / t € / t PS recyclé dans le cas du scénario 1 « ressource bois illimitée »
- 103 € / t PS recyclé dans le cas du scénario 2 a « compétition avec énergie fossile »
- 191 € / t PS recyclé dans le cas du scénario 2 b « compétition avec ENR ».

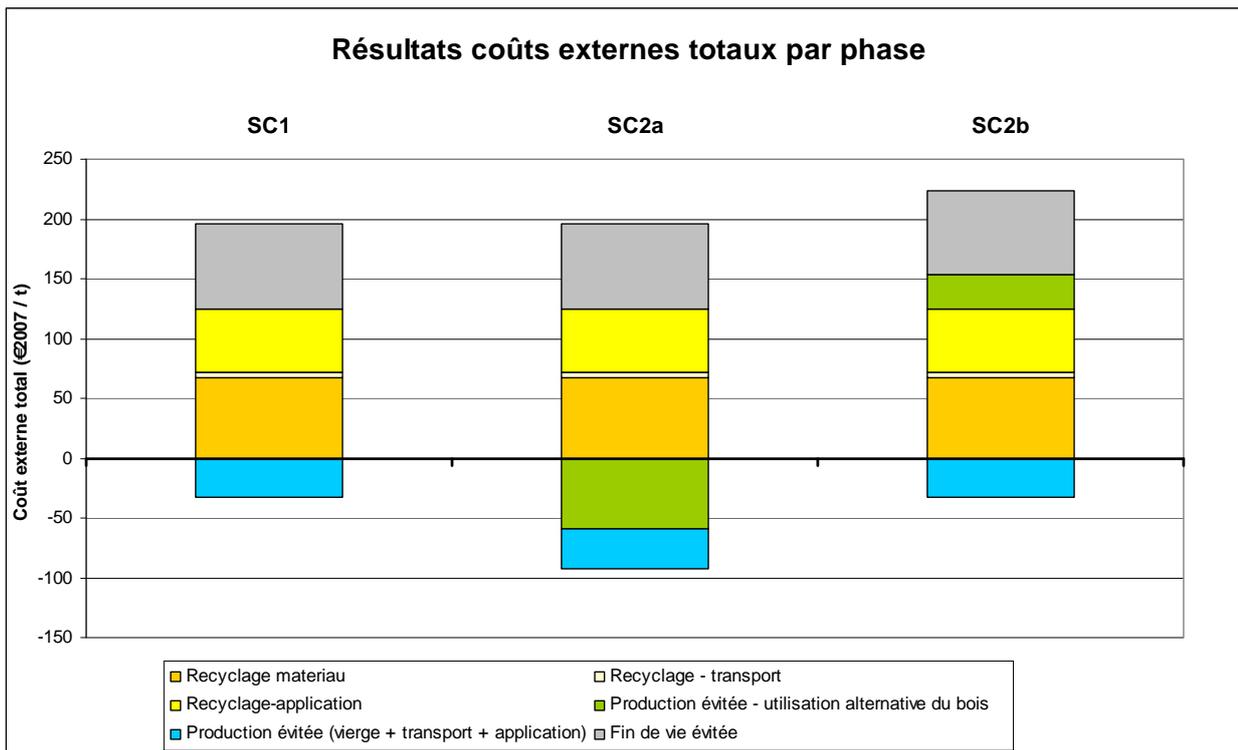


Figure 98 : Recyclage PS – Coût externe total - Résultats par phase

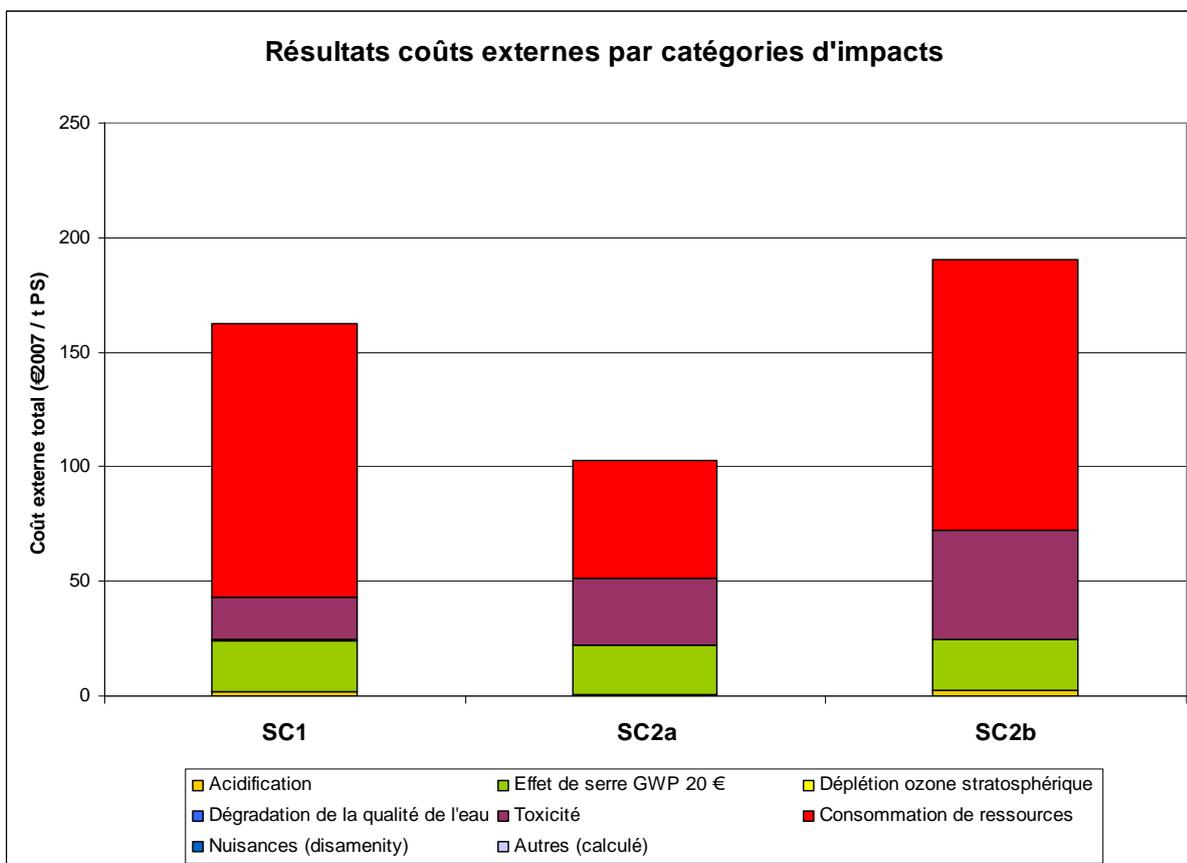


Figure 99 : Recyclage PS – Coût environnemental total - Résultats par catégorie d'impacts

	SC1	SC2a	SC2b
Recyclage materiau	68	68	68
Recyclage - transport	4	4	4
Recyclage-application	54	54	54
Production évitée - utilisation alternative du bois	0	-59	29
Production évitée (vierge + transport + application)	-33	-33	-33
Fin de vie évitée	70	70	70
TOTAL	162	103	191

	SC1	SC2a	SC2b
Recyclage materiau	42%	66%	35%
Recyclage - transport	2%	4%	2%
Recyclage-application	33%	52%	28%
Production évitée - utilisation alternative du bois	0%	-57%	15%
Production évitée (vierge + transport + application)	-20%	-32%	-17%
Fin de vie évitée	43%	68%	37%
TOTAL	100%	100%	100%

	Acidification	Effet de serre GWP 20 €	Déplétion ozone stratosphérique	Dégradation de la qualité de l'eau	Toxicité	Consommation de ressources	Nuisances (disamenity)	Autres (calculé)	TOTAL
SC1	2	23	0	0	18	119	0	0	162
SC2a	1	22	0	0	29	52	0	0	103
SC2b	2	23	0	0	47	118	0	0	191

Tableau 123 : Recyclage PS – Coût externe total - Résultats chiffrés

Les résultats présentés ci-dessus confirment les résultats précédents en termes de tendance.

En revanche, en termes de valeur absolue, les valeurs sont quasiment divisées par 2 par rapport aux coûts environnementaux de la catégorie de la consommation de ressources naturelles, car le coût de l'énergie a été partiellement internalisé.

La part de la toxicité humaine devient plus importante, car aucun coût lié à cet impact n'est internalisé.

Pour l'effet de serre en revanche, on ne constate pas une diminution du coût environnemental comme pour les autres catégories d'impacts, mais une augmentation. En effet, seul le CO2 fossile est internalisé (provient notamment de la non combustion de ressource fossile pour le scénario 2a). Or, la production de panneau de particules émet une quantité importante de CO2 biomasse (vraisemblablement issu de la combustion de copeaux de bois en chaudière) qui n'est pas internalisée. Puisque le coût environnemental total du CO2 fossile présente une valeur négative (bénéfice environnemental) et celui du CO2 biomasse une valeur positive, l'internalisation porte uniquement sur le bénéfice environnemental du recyclage et pas sur le coût. Au final, la valeur résultante augmente et le coût externe est plus élevé que le coût environnemental total.

B. Analyse de sensibilité

Le tableau ci-dessous indique l'influence d'une variation réaliste des paramètres du modèle sur les résultats :

Paramètre	Intervalle de valeur	Influence
Consommation d'électricité pour le recyclage du PS	670 kWh / t +/-10 %	Moyenne
Efficacité de recyclage (rendement)	0.8-0.9	Faible
Taux de substitution	0.48-0.76	Très Faible
Distance entre le centre de tri et le recycleur	200-600 km	Très faible
Distance entre le recycleur et le fabricant de bouteille	200-1100 km	Très faible
Consommation d'eau pour le recyclage du PS	30 L/t +/-10 %	Nulle

Tableau 124 : Recyclage PS - Influence des paramètres

Les graphiques ci-dessous sont le résultat de 1 000 itérations de calcul combinant les variantes de modélisation en fonction de ces différents paramètres :

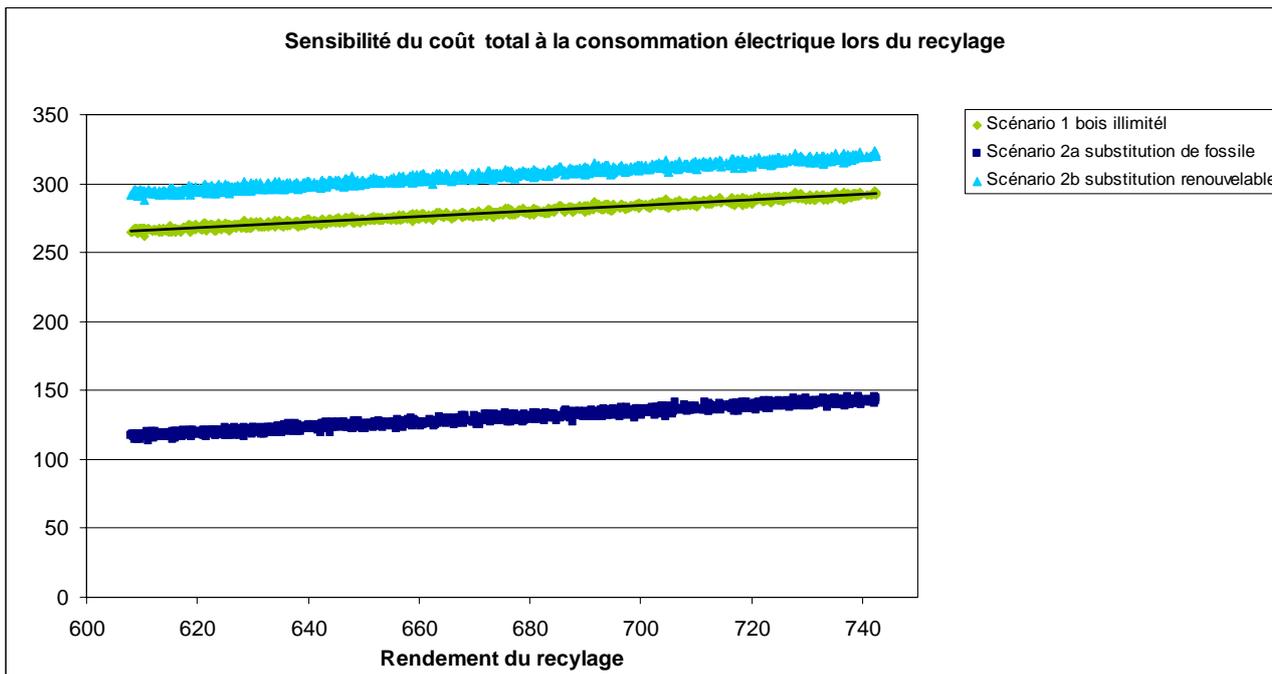


Figure 100 : Recyclage PS - Sensibilité des coûts environnementaux totaux à la consommation électrique lors du recyclage

Le graphe ci-dessus indique que plus la consommation électrique lors du recyclage du PS est élevée, plus les impacts environnementaux sont élevés. L'augmentation de 100 kwh/ t PS recyclé génère un impact supplémentaire de 7 % pour le coût externe total comme pour le coût environnemental total.

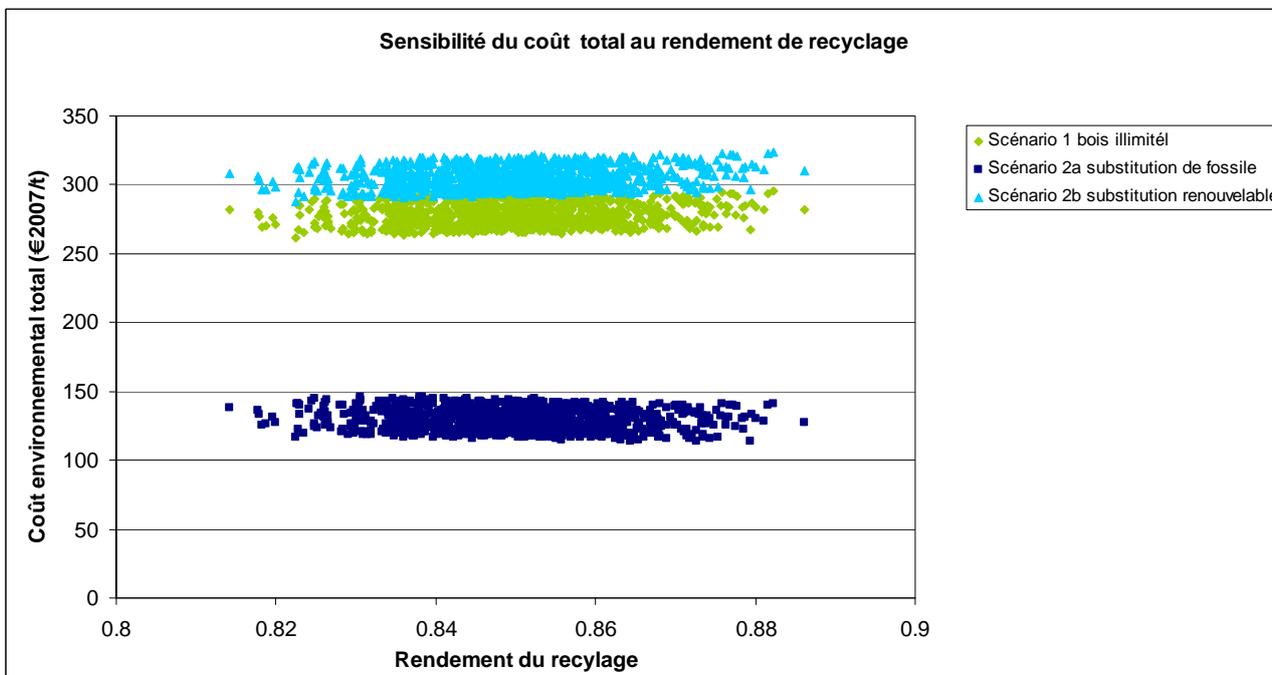


Figure 101 : Recyclage PS - Sensibilité des coûts environnementaux totaux à l'efficacité de recyclage

Le graphique ci-dessus indique que le coût environnemental n'est que très peu sensible à la variation de l'efficacité du taux de recyclage.

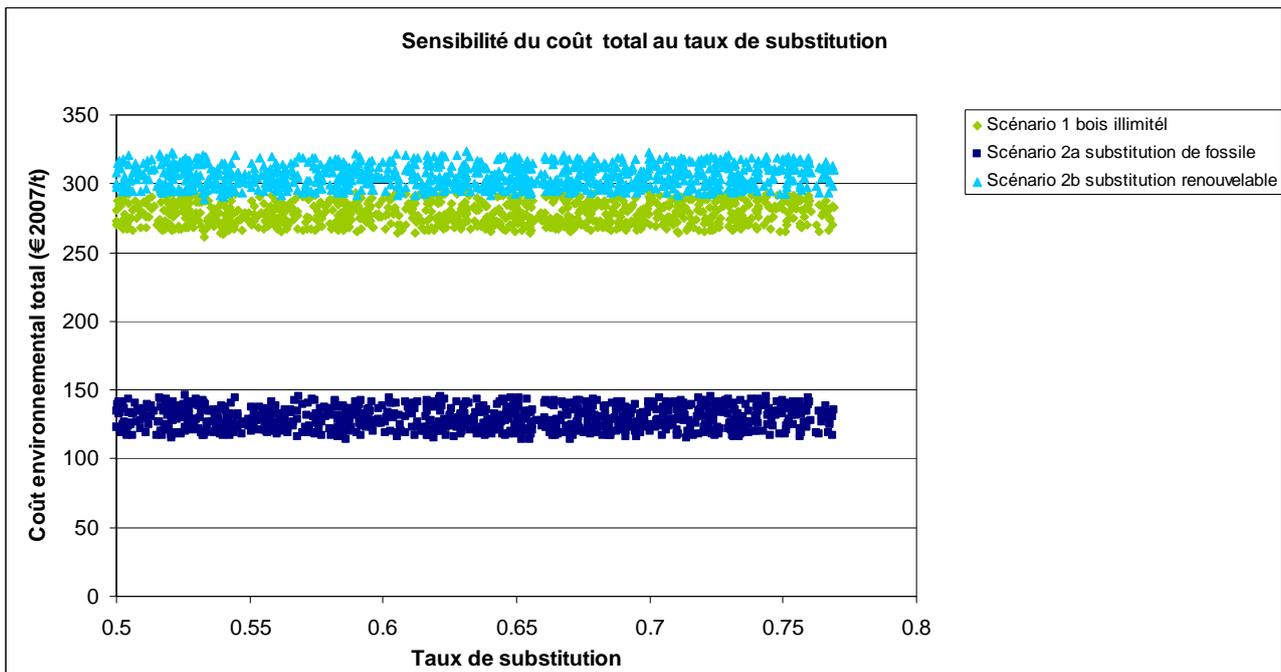


Figure 102 : Recyclage du PS - Sensibilité des coûts totaux en fonction du taux de substitution pour la fin de vie évitée du bois

Pour rappel, nous avons deux taux de substitution :

- Lorsque l'on raisonne en volume de bois : 1 → Production de panneaux en bois et utilisation alternative du bois
- Lorsque l'on raisonne en poids de bois : de 0,5 à 0,8 en fonction de la densité du bois (il s'agit du ratio entre la densité du bois et celle du PS) → Fin de vie évitée du bois

Seul le taux de substitution pour la fin de vie évitée est variable. Son influence sur le bilan global est donc très faible.

V.6.3.2 Variantes

A. Variantes liés au choix du mix électrique

Coût environnemental du recyclage d'une tonne de PS	Scénario 1		Scénario 2a		Scénario 2b	
	Coût environnemental total	Coût externe	Coût environnemental total	Coût externe	Coût environnemental total	Coût externe
Variante mix conséquentiel	278	162	129	103	306	190
Variante mix moyen	245	144	96	85	273	173

Tableau 125 : Recyclage PS - Résultats du scénario de base et de sa variante

Le tableau ci-dessus montre que dans tous les cas, le recyclage du PS (avec substitution de bois) se traduit par un bilan environnemental négatif pour la société.

Les différences de coût entre les deux variantes sont relativement importantes pour le scénario 2a (environ 20 %) et moins importantes pour les scénarios 1 et 2b (environ 10 %). En valeur absolue la différence entre les deux scénarios est

la même, mais étant donné que le coût du recyclage est plus faible pour le scénario 2a, l'importance relative du changement de mix électrique est plus importante.

Le montant des coûts externes totaux est moins élevé que le montant des coûts environnementaux totaux. Ceci est principalement dû à l'internalisation des coûts de l'énergie, qui représentent la plus grande partie des impacts.

B. . Variantes liées à la monétarisation de la catégorie d'impact "consommation de ressources"

Ces variantes portent sur deux paramètres :

- Scénario de base :
 - Le coût environnemental lié à la consommation d'énergie se base sur un prix de 64 \$ le baril (soit une internalisation de 53 %).
 - Le facteur de monétarisation de la consommation de ressources fossiles est de 0,015 € / MJ primaire.
- Variation sur le facteur de monétarisation de la consommation de ressources fossiles :
 - Le facteur de monétarisation de la consommation de ressources fossiles est de 0,012 € / MJ primaire.
 - Le facteur de monétarisation de la consommation de ressources fossiles est de 0,018 € / MJ primaire.
- Variation sur le degré d'internalisation (ne concerne que le coût externe) :
 - Le coût environnemental lié à la consommation d'énergie se base sur un prix de 100 \$ le baril
 - Le coût environnemental lié à la consommation d'énergie se base sur un prix de 150 \$ le baril

Coût environnemental du recyclage d'une tonne de PS		Coût environnemental total	Coût externe		
			Prix de 64\$ le baril	Prix de 100\$ le baril	Prix de 150\$ le baril
Valeur retenue	0,015 e/MJ	278	162	64	43
Valeur basse	0,012 e/MJ	230	114	43	43
Valeur haute	0,018 e/MJ	327	217	140	43

Tableau 126 : Résultats du recyclage du PS selon le prix du baril de pétrole – Scénario 1

Coût environnemental du recyclage d'une tonne de PS		Coût environnemental total	Coût externe		
			Prix de 64\$ le baril	Prix de 100\$ le baril	Prix de 150\$ le baril
Valeur retenue	0,015 e/MJ	131	103	60	51
Valeur basse	0,012 e/MJ	111	82	51	51
Valeur haute	0,018 e/MJ	150	126	93	51

Tableau 127 : Résultats du recyclage du PS selon le prix du baril de pétrole – Scénario 2a

Coût environnemental du recyclage d'une tonne de PS		Coût environnemental total	Coût externe		
			Prix de 64\$ le baril	Prix de 100\$ le baril	Prix de 150\$ le baril
Valeur retenue	0,015 e/MJ	306	190	93	72
Valeur basse	0,012 e/MJ	258	143	72	72
Valeur haute	0,018 e/MJ	354	244	169	72

Tableau 128 : Résultats du recyclage du PS selon le prix du baril de pétrole – Scénario 2b

Le tableau ci-dessus montre les mêmes tendances que celles observées avec le PET (et les autres plastiques) :

- la valeur du facteur de monétarisation influence fortement le coût environnemental total : la variation du coût est directement liée à celle du facteur de monétarisation, car la catégorie « consommation de ressources » est de loin la plus contributive dans le bilan environnemental du recyclage ;
- la variation du prix du baril a une incidence très forte sur le coût externe total. Pour un prix du baril de 150 \$, le prix de l'énergie est totalement internalisé, et de ce fait le coût externe est très bas et ne représente plus que le coût monétarisé des autres catégories d'impact.

C. Variantes liées à la monétarisation de la catégorie d'impact « effet de serre »

Coût environnemental du recyclage d'une tonne de PS		Coût environnemental total	Coût externe		
			0 % internalisation pour tous les GES	100 % internalisation CO2, 0 % pour autres GES	100 % internalisation
Objectif Kyoto	20 € / t CO2	278	155	162	140
Objectif Durabilité, valeur basse	50 € / t CO2	301	178	196	140
Objectif Durabilité, valeur haute	96 € / t CO2	337	213	248	140

Tableau 129 : Recyclage PS – Scénario1 - Résultats du scénario Mix consécutif selon le degré d'internalisation des coûts des émissions de gaz à effet de serre

Coût environnemental du recyclage d'une tonne de PS		Coût environnemental total	Coût externe		
			0 % internalisation pour tous les GES	100 % internalisation CO2, 0 % pour autres GES	100 % internalisation
Objectif Kyoto	20 € / t CO2	131	82	103	81
Objectif Durabilité, valeur basse	50 € / t CO2	132	83	135	81
Objectif Durabilité, valeur haute	96 € / t CO2	133	84	185	81

Tableau 130 : Recyclage PS – Scénario2a - Résultats du scénario Mix consécutif selon le degré d'internalisation des coûts des émissions de gaz à effet de serre

Coût environnemental du recyclage d'une tonne de PS		Coût environnemental total	Coût externe		
			0 % internalisation pour tous les GES	100 % internalisation CO2, 0 % pour autres GES	100 % internalisation
Objectif Kyoto	20 € / t CO2	306	183	190	168
Objectif Durabilité, valeur basse	50 € / t CO2	329	206	224	168
Objectif Durabilité, valeur haute	96 € / t CO2	364	241	276	168

Tableau 131 : Recyclage PS – Scénario2b - Résultats du scénario Mix consécutif selon le degré d'internalisation des coûts des émissions de gaz à effet de serre

Le tableau ci-dessus montre que la valeur du facteur de monétarisation des gaz à effet de serre influence très fortement le coût environnemental total (pour les scénarios 1 et 2b, variation de 16 à 18 % de la valeur du coût entre l'hypothèse de 20 € / t CO2 et 96 € / t CO2) et le coût environnemental externe en cas d'internalisation nulle (situation peu probable).

Dans le scénario 2a, la valeur du coût environnemental total pour la catégorie d'effet de serre est très faible (1 €) et l'influence de la valeur du facteur de monétarisation est donc très faible également.

L'internalisation des coûts de **tous** les gaz à effet de serre en plus du CO2 fossile implique l'internalisation des coûts liés aux émissions de CO2 biomasse. Il en résulte une diminution du coût environnemental. Pour un scénario donné, la diminution sera d'autant plus importante que le facteur de monétarisation est élevé. Pour un facteur de monétarisation donné, cette diminution aura la même valeur absolue pour les trois scénarios. Ceci est dû au fait que ces émissions proviennent de la production du panneau en bois, qui est identique pour les trois scénarios.

V.7 Recyclage d'ABS provenant des DEEE

V.7.1. Contexte

L'ABS étudié provient plus spécifiquement des DEEE car il s'agit d'un flux amené à se développer dans les prochaines années du fait du développement de la filière DEEE.

L'ABS représente environ 30 % du total des poids des plastiques contenus dans les DEEE. Il est très souvent utilisé sous forme d'alliage (mélange de plastiques) en association avec le polycarbonate, et dans une moindre mesure avec le HIPS et le PPO.

Les trois principales applications dans lesquelles l'ABS s'est fortement développé ces dernières années sont :

- Matériel informatique : boîtiers d'unités centrales (ABS ou alliages ABS/PC et ABS/HIPS), claviers (coque en ABS ou ABS/PC) et boîtiers d'écrans de micro-ordinateurs (ABS/PC). L'usage des alliages ABS/PC s'est fortement développé au cours des 5 dernières années.
 - Produits bruns : enveloppes extérieures des téléviseurs à écrans plats (environ 10 % du poids de l'appareil). De plus, 60 à 70 % des appareils mis sur le marché ont des enveloppes en alliages ABS/PC et 30 à 40 % en HIPS ou en PPO/PS. Le développement des alliages ABS/PC est dû à des contraintes techniques, liées en particulier à la température d'utilisation élevée. Pour mémoire, l'enveloppe des téléviseurs à tubes cathodiques est majoritairement en HIPS.
- Applications professionnelles : dans les interrupteurs, l'ABS représente 60 % des plastiques contenus.

V.7.2. Hypothèses de modélisation

V.7.2.1 Unité fonctionnelle

L'unité fonctionnelle modélisée est le recyclage une tonne supplémentaire d'ABS issu du flux de DEEE collecté sélectivement en France.

V.7.2.2 État du marché des matières secondaires

A. Introduction

La consommation d'ABS représente 0,8 millions de tonnes au niveau européen (5,4 millions de tonnes au niveau mondial).

Les débouchés de l'ABS recyclé sont extrêmement divers : pièces pour les produits électriques et électroniques, pièces pour véhicules, cageots, pièces pour téléphones, valises, mobilier...

Ces débouchés représentent aujourd'hui de faibles tonnages, environ 20 à 30 kilotonnes au niveau européen.

B. Situation actuelle

Actuellement, les débouchés de l'ABS sont faibles mais supérieurs à l'offre en recyclé.

Les filières actuelles ne sont pas à très haute valeur ajoutée compte tenu de la faible qualité des résines recyclées.

C. Situation prospective

A moyen terme, compte tenu des évolutions techniques (réduction des retardateurs de flamme bromés) et de la demande on peut penser que les débouchés de l'ABS seront tournés vers des applications à plus haute valeur ajoutée, soit en remplacement d'ABS vierge.

Modélisation :

→ L'ABS recyclé trouvera un débouché. L'intégration de l'ABS dans des produits neufs n'est pas le facteur limitant. Les bénéfices du recyclage sont donc alloués à 100 % au système amont qui fournit la matière recyclée.

Les matériaux avec lequel l'ABS se substitue sont :

- l'ABS vierge
- le PP

Modélisation :

→ Filière sélectionnée : L'ABS recyclé sera utilisé dans des enveloppes de téléviseurs à écran plat. L'ABS recyclé viendra substituer de l'ABS vierge.

V.7.2.3 Données techniques utilisées

A. Qualité

Actuellement les débouchés en ABS à forte valeur ajoutée sont limités du fait de différents obstacles :

- L'ABS est souvent utilisé en alliage avec le polycarbonate. Or ces alliages contiennent des retardateurs de flamme bromés. La présence de ces retardateurs entraîne dans les alliages de ces matières recyclées une dépolymérisation du polycarbonate.
- La présence de contaminants génère également une perte de qualité : la résistance à l'impact peut être diminuée d'un facteur 10 avec des plastiques recyclés dans les EEE. Aussi, les produits incorporent en général des mélanges vierge-recyclé pour limiter la perte de qualité. En général, l'ABS vierge est utilisé pour la surface du produit et les alliages ABS /PS recyclés pour le cœur.

Modélisation :

→ Le taux de substitution sera faible. Compte tenu des incertitudes, dans la modélisation, on fera varier ce taux entre 0,5 et 0,9 (résultats moyens à 0,7).

B. Procédés de recyclage

Le procédé de recyclage considéré consiste en un broyage et lavage.

Faute de données fournies par les recycleurs, nous nous sommes basées sur des hypothèses qui sont les suivantes :

	Électricité	Eau
Recyclage ABS	670 kWh	30 L

Tableau 132 : Consommations du recyclage du PS en tonnes entrantes⁷⁶

Compte tenu des incertitudes sur ces valeurs, nous ferons varier ces données de +/-10 %.

Le rendement de recyclage considéré est de 85 % en moyenne (+/-5 %).

C. Production de la matière vierge et du produit fini

La production d'ABS vierge est modélisée par le procédé EcoInvent N°1817 (production d'ABS).

⁷⁶ Source : d'après des visites de différents recycleurs en Europe, 2008, RDC Environment.

L'application dans laquelle est utilisée l'ABS recyclé est le cadre de téléviseur. L'ABS est injecté et moulé pour produire de telles pièces. Le procédé considéré est le procédé d'injection moulage d'Ecolnvent (N°1853).

V.7.3. Résultats

Le modèle correspondant à la décision de recycler une tonne supplémentaire d'ABS se décompose en plusieurs étapes ou phases.

Elles correspondent soit à des effets engendrés par la décision (et comptabilisées positivement) soit à des effets évités par la décision. Elles sont décrites dans le tableau ci-dessous :

Phases	Étapes considérées
Recyclage de l'ABS	Recyclage – matériau (ABS recyclé)
	Recyclage – application (Fabrication du cadre de téléviseur à partir d'ABS recyclé)
	Recyclage – Transport (transport centre de tri- recycleur et recycleur –application)
Production évitée	Production évitée – matériau (Fabrication de granules d'ABS vierge)
	Production évitée – application (Fabrication du cadre de téléviseur à partir d'ABS vierge)
	Production évitée – transport (transport producteur – application) ⁷⁷
Fin de vie évitée	Élimination en CSDU et/ou incinérateur évitée grâce au recyclage

Tableau 133 : Recyclage de l'ABS– Description des phases

Rappel :

Les impacts environnementaux du recyclage sont monétarisés et sont présentés sous forme de "coût environnemental total" et de "coût externe total".

Ces coûts sont exprimés en € 2007 par unité fonctionnelle (1 tonne d'ABS recyclé)

Une valeur positive indique un coût pour la société et une valeur négative indique un bénéfice pour la société.

V.7.3.1 Scénario de base

Le scénario de base retient les hypothèses suivantes :

- Approche conséquentielle pour la production d'électricité
- Facteur de monétarisation de la consommation de ressource : 0,015 € / MJ primaire
- Facteur de monétarisation des gaz à effet de serre : prix actuel de la tonne de CO2 sur le marché européen d'échange de quotas de CO2 (20 € / t CO2)
- Calcul du coût externe : Taux d'internalisation des coûts de la ressource de 53 % (correspond à un prix e 64 \$ le baril)
- Calcul du coût externe : Taux d'internalisation des coûts des émissions de gaz à effet de serre de 100 % pour le CO2 et 0 % pour les autres gaz à effet de serre.

A. Bilan par phase

- Coût environnemental total

Le coût présente une valeur négative, il s'agit donc d'un bénéfice. Ce bénéfice environnemental total moyen est de 686 € / t ABS recyclé.

⁷⁷ Le transport concernant la production de matière vierge est intégré dans la phase production évitée -matériau, mais aucune valeur n'est fournie dans le LCI.

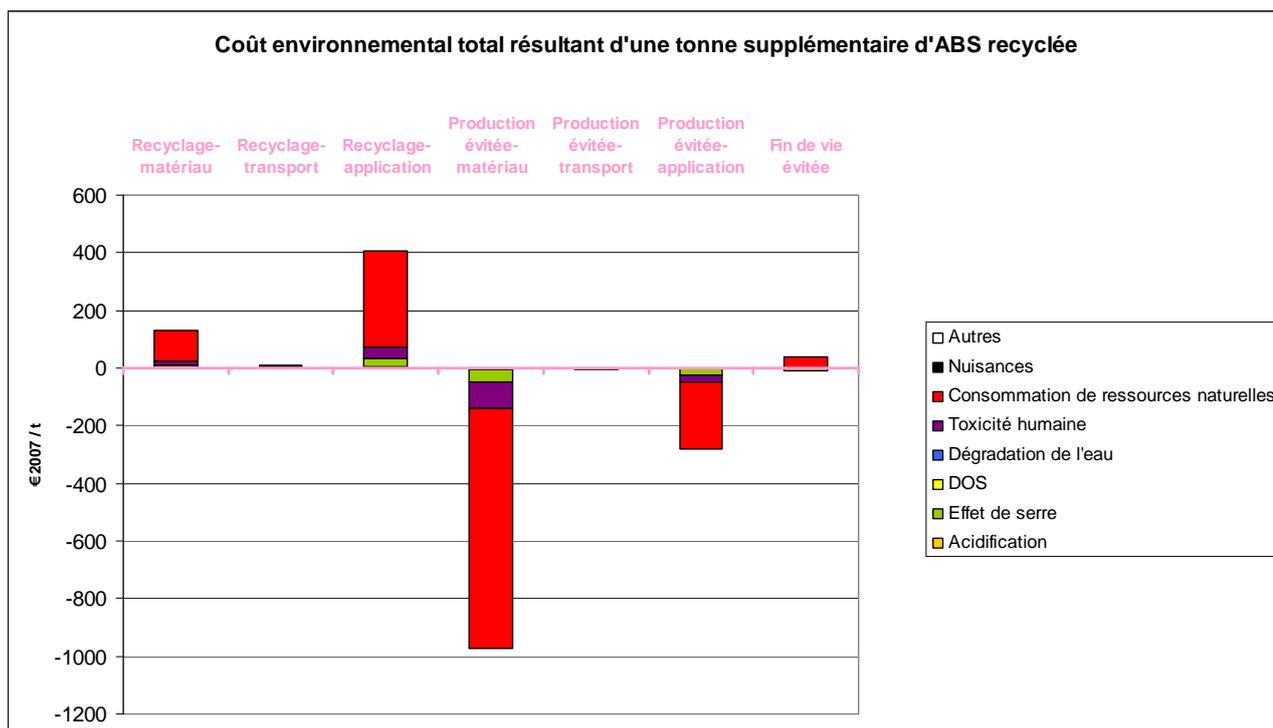
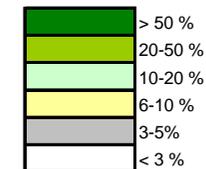


Figure 103 : Recyclage d'ABS- Résultats par phase - Coût environnemental total

Phases	Acidification	Effet de serre	DOS	Dégradation de l'eau	Toxicité humaine	Consommation de ressources naturelles	Nuisances	Autres	Coût environnemental total
Recyclage-matériau	1	9	0	0	14	105	0	0	130
Recyclage-transport	0	1	0	0	2	9	0	0	12
Recyclage-application	3	30	0	1	38	332	0	0	405
Production évitée-matériau	-7	-42	0	0	-92	-833	0	-1	-974
Production évitée-transport	0	0	0	0	-1	-3	0	0	-4
Production évitée-application	-2	-21	0	-1	-27	-230	0	0	-281
Fin de vie évitée	0	-9	0	-1	-1	38	0	0	28
Total	-5	-32	0	-1	-66	-582	0	-1	-686

Phases	Acidification	Effet de serre	DOS	Dégradation de l'eau	Toxicité humaine	Consommation de ressources naturelles	Nuisances	Autres	Coût environnemental total
Recyclage-matériau	0%	1%	0%	0%	2%	15%	0%	0%	19%
Recyclage-transport	0%	0%	0%	0%	0%	1%	0%	0%	2%
Recyclage-application	0%	4%	0%	0%	6%	48%	0%	0%	59%
Production évitée-matériau	1%	6%	0%	0%	13%	121%	0%	0%	142%
Production évitée-transport	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%
Production évitée-application	0%	3%	0%	0%	4%	34%	0%	0%	41%
Fin de vie évitée	0%	1%	0%	0%	0%	6%	0%	0%	4%
Total	1%	5%	0%	0%	10%	85%	0%	0%	100%

Légende

Tableau 134 : Résultats chiffrés (en valeur absolue) - Recyclage d'ABS – Coût environnemental total⁷⁸

⁷⁸ Les pourcentages sont calculés par rapport au coût total, en valeur absolue. Dès lors, les contributions relatives peuvent être supérieures à 100 %.

Le graphique et les tableaux ci-dessus montrent que les phases qui ont un impact défavorable sur l'environnement sont, par ordre d'importance :

- la fabrication de l'application qui utilise la matière recyclée, à savoir le cadre de téléviseur en ABS recyclé (59 %) ;
- le recyclage de l'ABS en granules (19 %) ;
- la fin de vie évitée : en effet, en recyclant, on évite une part d'incinération qui elle-même permettait d'éviter la production de chaleur et la production d'électricité (4 %).

Note : cette fin de vie évitée est relativement peu impactante car on considère une fin de vie en déchets encombrants (80 % décharge, 20 % incinération) et non en ordures ménagères brutes.

A l'inverse, les phases qui génèrent des bénéfices sont les phases suivantes :

- Production évitée d'ABS vierge (142 %),
- Fabrication évitée du cadre de téléviseur à partir d'ABS vierge (41 %).

Les transports pèsent seulement pour 3 % des impacts environnementaux.

Les bénéfices étant plus importants que les coûts (2 fois plus importants), le recyclage de l'ABS présente un bilan global favorable pour l'environnement.

Concernant les différentes catégories d'impacts, les économies de production de matière vierge impactent favorablement les catégories d'impact "consommation de ressources fossiles" (contribution de 121 %) et "toxicité humaine" (13 %) et "effet de serre" (6 %).

• **Coût externe total**

Le bénéfice externe moyen est de 345 € / tonne d'ABS recyclé.

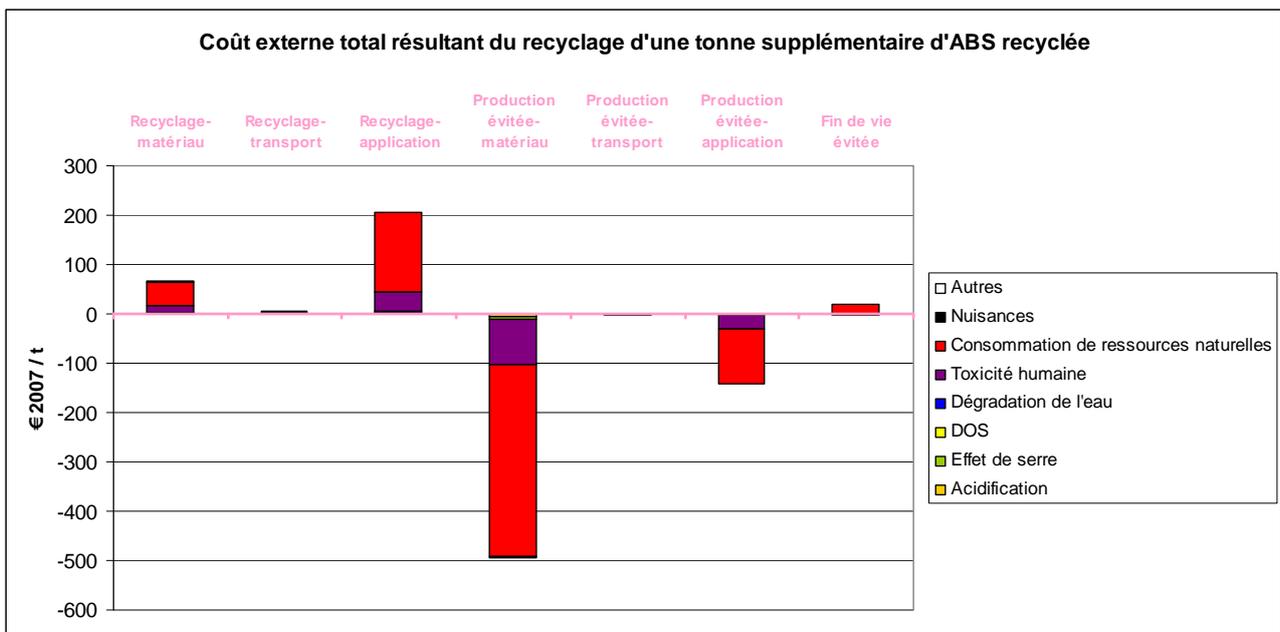


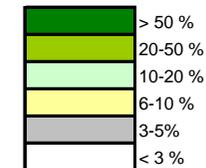
Figure 104 : Recyclage de l'ABS – Résultats par phase – Coût externe total

Phases	Acidification	Effet de serre	DOS	Dégradation de l'eau	Toxicité humaine	Consommation de ressources naturelles	Nuisances	Autres	Coût environnemental total
Recyclage-matériau	1	1	0	0	14	49	0	0	65
Recyclage-transport	0	0	0	0	2	4	0	0	6
Recyclage-application	3	2	0	0	38	162	0	0	205
Production évitée-matériau	-7	-3	0	0	-92	-391	0	-1	-494
Production évitée-transport	0	0	0	0	-1	-2	0	0	-2
Production évitée-application	-2	-1	0	0	-27	-112	0	0	-143
Fin de vie évitée	0	-1	0	0	-1	18	0	0	16
Total	-5	-3	0	0	-66	-271	0	-1	-345

0.466033912

Phases	Acidification	Effet de serre	DOS	Dégradation de l'eau	Toxicité humaine	Consommation de ressource	Nuisances	Autres	Coût externe total
Recyclage-matériau	0%	0%	0%	0%	4%	14%	0%	0%	19%
Recyclage-transport	0%	0%	0%	0%	0%	1%	0%	0%	2%
Recyclage-application	1%	1%	0%	0%	11%	47%	0%	0%	59%
Production évitée-matériau	2%	1%	0%	0%	27%	113%	0%	0%	143%
Production évitée-transport	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%
Production évitée-application	1%	0%	0%	0%	8%	33%	0%	0%	41%
Fin de vie évitée	0%	0%	0%	0%	0%	5%	0%	0%	5%
Total	1%	1%	0%	0%	19%	78%	0%	0%	100%

Légende

Tableau 135 : Résultats chiffrés (en valeur absolue)- Recyclage de l'ABS - Coût externe total ⁷⁹

⁷⁹ Les pourcentages sont calculés par rapport au coût total, en valeur absolue. Dès lors, les contributions relatives peuvent être supérieures à 100 %.

Les résultats présentés ci-dessus confirment la tendance des résultats précédents.

En valeur absolue, les valeurs sont quasiment divisées par 2 par rapport aux coûts environnementaux totaux. Ceci est dû à l'internalisation de coûts importants, soit le coût du CO2 fossile (internalisation totale) et, surtout, celui de l'énergie (internalisation partielle – voir II.2.5).

On constate en outre que la catégorie d'impact effet de serre devient négligeable. En effet, dans les coûts environnementaux totaux, parmi les flux élémentaires qui constituent la catégorie effet de serre sont composés, le CO2 est de loin le plus impactant. Dès lors que le coût CO2 est internalisé, le coût externe de l'effet de serre ne représente donc plus que 10 % de son coût environnemental total.

Les économies de matière vierge impactent favorablement le bilan environnemental au travers des catégories d'impact de la consommation de ressources fossiles (103 %) et dans une moindre mesure de la toxicité humaine (24 %). La part de la toxicité humaine devient plus importante, car aucun coût lié à cet impact n'est internalisé.

B. Analyse de sensibilité

Le tableau ci-dessous indique l'influence d'une variation réaliste des paramètres du modèle sur les résultats :

Paramètre	Intervalle de valeurs	Influence
Taux de substitution	0.5-0.9	Très forte
Consommation d'électricité pour le recyclage de l'ABS	670 kWh / t +/-10%	Très faible
Efficacité de recyclage (rendement)	80-90 %	Nulle
Distance entre le centre de tri et le recycleur	200-600 km	Nulle
Distance entre le recycleur et le fabricant de bouteille	200-1100 km	Nulle
Consommation d'eau pour le recyclage de l'ABS	30 L / t +/-10%	Nulle
Consommation de détergent pour le recyclage de l'ABS	20 kg/ t +/-10%	Nulle

Tableau 136 : Recyclage de l'ABS - Influence des paramètres

Les graphiques ci-dessous sont le résultat de 1 000 itérations de calcul combinant les différentes valeurs possibles des paramètres variables.

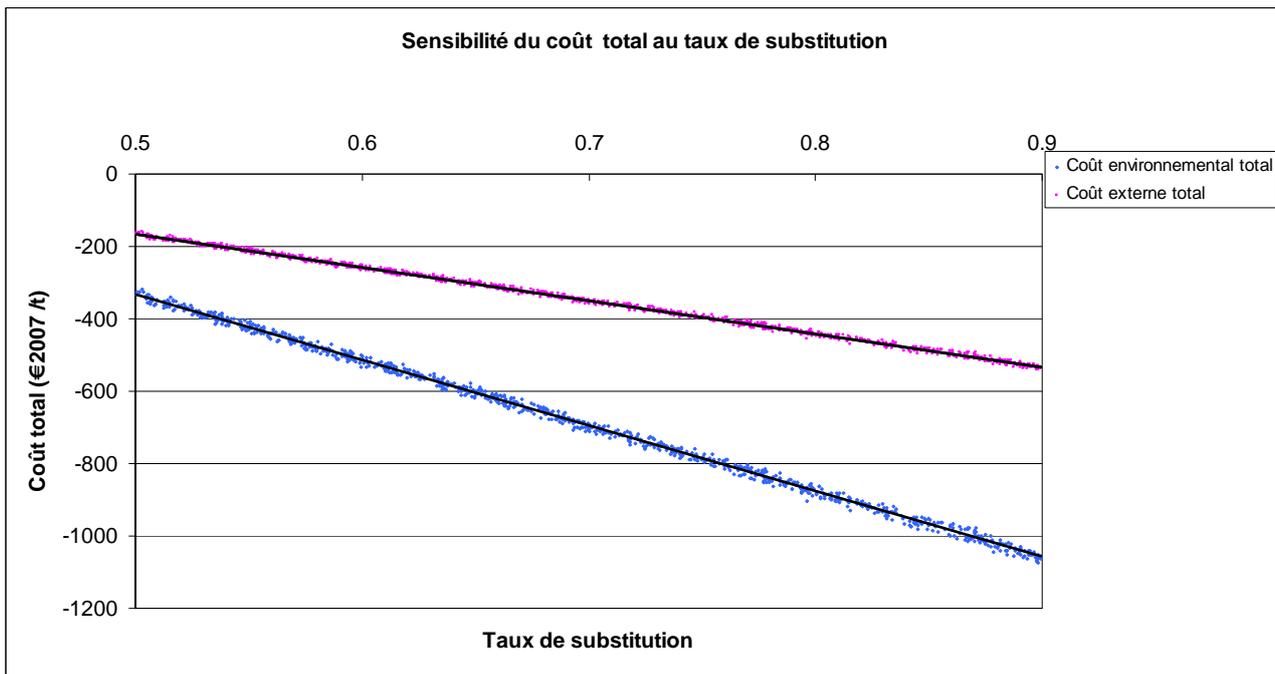


Figure 105 : Recyclage ABS - Sensibilité des coûts totaux au taux de substitution

Le graphe ci-dessus indique que plus le taux de substitution est élevé, plus grand est le bénéfice environnemental. L'augmentation de 10 % du taux de substitution entraîne une augmentation du bénéfice environnemental de l'ordre de 17 %.

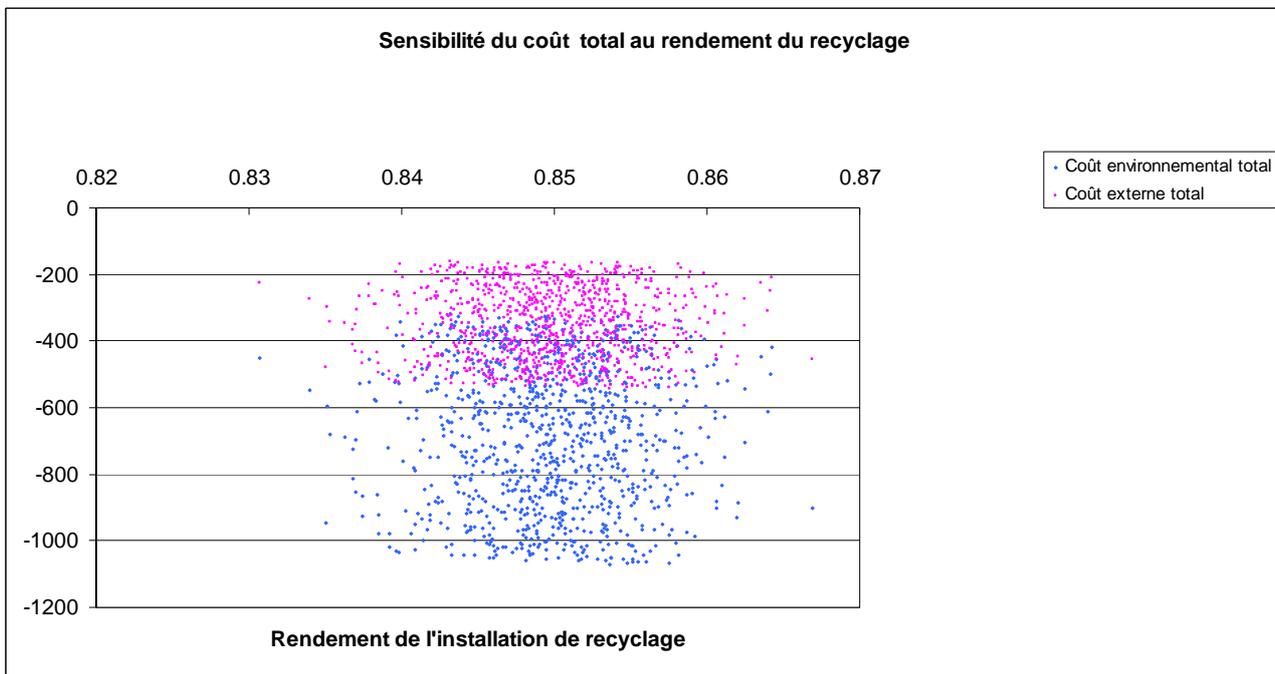


Figure 106 : Recyclage ABS - Sensibilité des coûts totaux à l'efficacité de recyclage

Le graphique ci-dessus indique qu'il n'existe pas de sensibilité significative des résultats au rendement du recyclage.

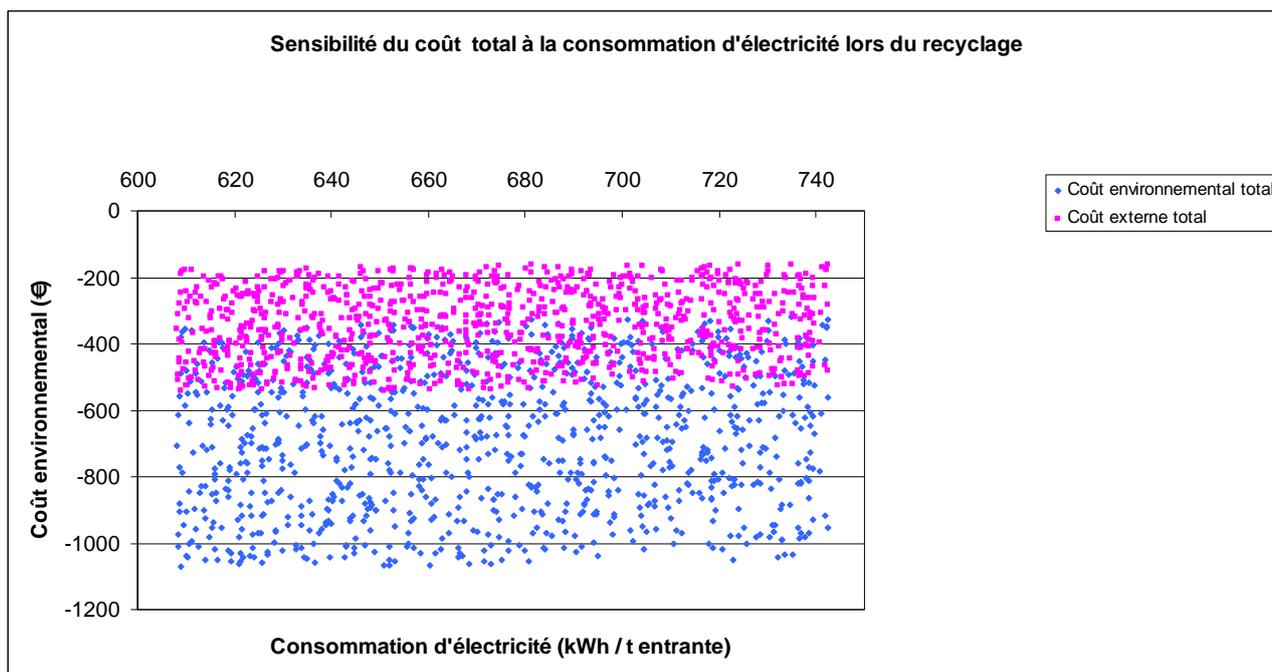


Figure 107 : Recyclage ABS - Sensibilité des coûts totaux à la consommation électrique du recyclage

Le graphique ci-dessus montre qu'il n'existe pas de sensibilité significative des résultats à la consommation d'électricité du procédé de recyclage.

Les autres résultats indiquent qu'il n'existe pas de sensibilité des résultats à la distance entre le centre de tri et le recycleur. Une conclusion identique est tirée pour la distance entre le recycleur et l'unité de production de la bouteille.

Un dernier paramètre a été testé : il s'agit du scénario de fin de vie (il s'agit de la fin de vie évitée de l'ABS). En effet l'hypothèse retenue est que l'ABS part dans une collecte d'encombrant pour laquelle il existe aujourd'hui peu d'incinération.

Le scénario de base considère 80 % de mise en décharge. Nous avons testé la sensibilité des résultats à l'évolution du taux de mise en décharge entre 47 % (situation des déchets ménagers en 2007 en France) et 100 %.

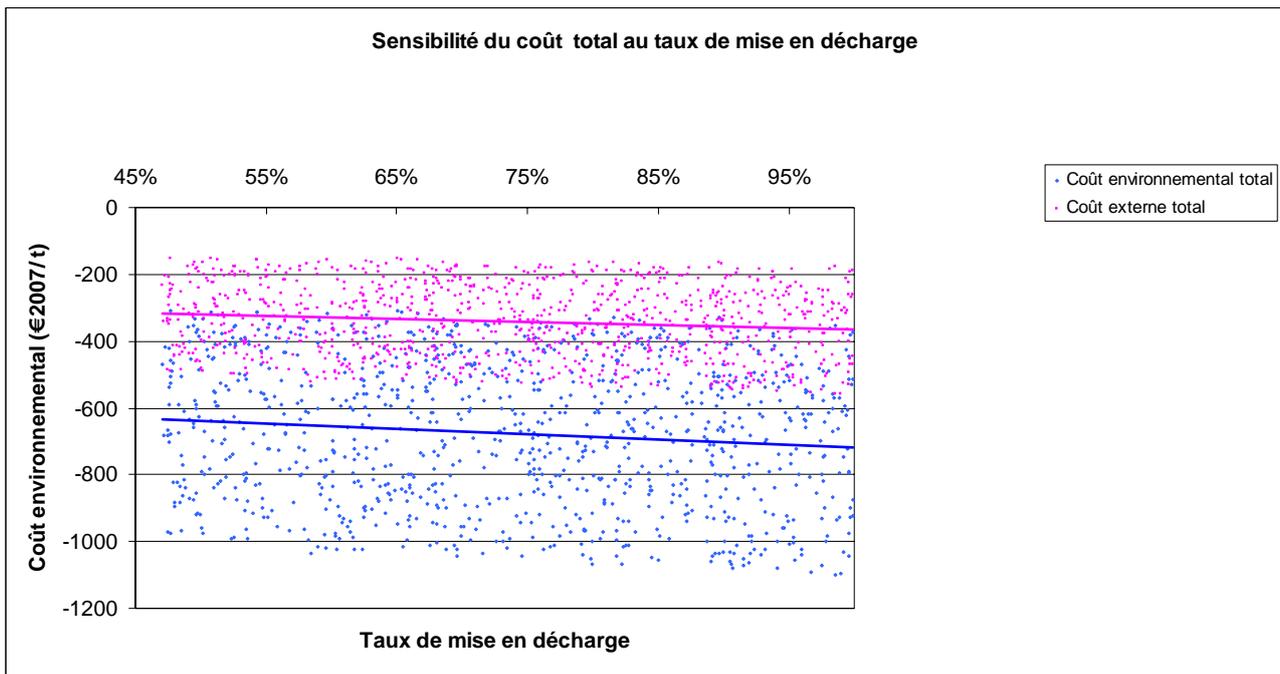


Figure 108 : Recyclage ABS - Sensibilité des coûts totaux à scénario de fin de vie

On constate que les résultats sont sensibles au scénario de fin de vie, sans pour autant modifier la tendance générale : l'augmentation de 10 % du taux de mise en décharge génère une augmentation de 3 % du bénéfice environnemental.

V.7.3.2 Variantes

A. Variante liée au choix du mix électrique

Une variante est proposée : Utilisation des mix électriques moyens au lieu des mix électriques consécutifs.

Coût environnemental du recyclage d'une tonne d'ABS	Coût environnemental total	Coût externe
Variante mix marginal	-686	-345
Variante mix moyen	-717	-363

Tableau 137 : Recyclage du ABS - Résultats du scénario de base et de la variante "mix moyen"

Le tableau ci-dessus montre que dans tous les cas, le recyclage de l'ABS se traduit par un bénéfice environnemental pour la société.

Les différences de coût entre les deux variantes sont très faibles (de l'ordre de 4 %).

Les mix électriques moyen et consécutif européens et français sont en effet composés à 100 % d'énergie fossile et nucléaire. Or ces moyens de production ont un impact similaire sur la consommation de ressources naturelles). Ils présentent en outre un part assez similaire d'énergie fossile (influence sur l'effet de serre) : respectivement 87 % et 100 % pour les mix européens et 10 % et 0 % pour les mix français⁸⁰.

⁸⁰ Voir V.1.3.2 pour la composition de ces mix

B. . Variantes liées à la monétarisation de la catégorie d'impact "consommation de ressources"

Ces variantes portent sur deux paramètres :

- Scénario de base :
 - Le coût environnemental lié à la consommation d'énergie se base sur un prix de 64 \$ le baril (soit une internalisation de 53 %).
 - Le facteur de monétarisation de la consommation de ressources fossiles est de 0,015 € / MJ primaire.
- Variation sur le facteur de monétarisation des consommations de ressources fossiles :
 - Le facteur de monétarisation de la consommation de ressources fossiles est de 0,012 € / MJ primaire.
 - Le facteur de monétarisation de la consommation de ressources fossiles est de 0,018 € / MJ primaire.
- Variation sur le degré d'internalisation (ne concerne que le coût externe) :
 - Le coût environnemental lié à la consommation d'énergie se base sur un prix de 100 \$ le baril.
 - Le coût environnemental lié à la consommation d'énergie se base sur un prix de 150 \$ le baril.

Coût environnemental du recyclage d'une tonne d'ABS		Coût environnemental total	Coût externe		
			Prix de 64\$ le baril	Prix de 100\$ le baril	Prix de 150\$ le baril
Valeur retenue	0,015 e/MJ	-686	-345	-123	-74
Valeur basse	0,012 e/MJ	-569	-236	-74	-74
Valeur haute	0,018 e/MJ	-802	-469	-296	-74

Tableau 138 : Recyclage ABS- Résultats selon le prix du baril de pétrole

Le tableau ci-dessus montre que la valeur du facteur de monétarisation influence fortement le coût environnemental total : la variation du coût est directement liée à celle du facteur de monétarisation, car la catégorie « consommation de ressources » est de loin la plus contributive dans le bilan environnemental du recyclage.

De plus, la variation du prix du baril a une incidence très forte sur le coût externe total. Pour un prix du baril de 150 \$, le prix de l'énergie est totalement internalisé, et de ce fait le coût externe est très bas et ne représente plus que le coût monétarisé des autres catégories d'impact.

C. Variantes liées à la monétarisation de la catégorie d'impact "effet de serre"

Ces variantes portent sur deux paramètres :

- Scénario de base :
 - Le coût environnemental lié aux émissions de CO2 est internalisé à 100 % pour le CO2 et à 0 % pour les autres GES.
 - La tonne de CO2 vaut 20 €
- Variation sur le degré d'internalisation (ne concerne que le coût externe) :
 - 0% du coût environnemental des émissions de GES est internalisé

- 100 % du coût environnemental des émissions de GES sont internalisés
- Variation sur le facteur de monétarisation des émissions de GES⁸¹ :
 - La tonne de CO2 vaut 50 €
 - La tonne de CO2 vaut 96 €

NB. Concernant le mix électrique, le scénario de base est considéré, autrement dit les mix consécutifs.

Impact environnemental du recyclage d'une tonne d'ABS		Coût environnemental total	Coût externe		
			0 % internalisation pour tous les GES	100 % internalisation CO2, 0 % pour autres GES	100 % internalisation pour tous les GES
Objectif Kyoto	20 € / t CO2 eq.	-686	-374	-345	-343
Objectif Durabilité, valeur basse	50 € / t CO2 eq.	-733	-422	-350	-343
Objectif Durabilité, valeur haute	96 € / t CO2 eq.	-805	-494	-356	-343

Tableau 139 : Recyclage ABS - Résultats selon le degré d'internalisation des coûts des émissions de GES

Le tableau ci-dessus montre que la valeur du facteur de monétarisation des gaz à effet de serre influence le coût environnemental total (variation de 17 % de la valeur du coût entre l'hypothèse de 20 € / t CO2 et 96 € / t CO2) et le coût environnemental externe en cas d'internalisation nulle (situation peu probable) (variation de 30 %).

Si le degré d'internalisation est fort, la valeur du facteur de monétarisation influence peu les coûts externes (variation maximum de 1 %).

Pour un facteur de monétarisation donné, l'internalisation des coûts de **tous** les gaz à effet de serre entraîne une diminution de la valeur du coût externe. Plus la valeur du facteur de monétarisation est élevée, plus l'influence du degré d'internalisation est forte, entraînant jusqu'à une différence de 44 % entre les deux scénarios extrêmes (0 % et 100 % d'internalisation) pour un facteur de 96 €/tonne CO2.

Note : si la part des différentes catégories d'impact diffère un peu selon la valeur du facteur de monétarisation effet de serre, la catégorie consommation de ressources demeure la plus impactante.

⁸¹ Ces valeurs sont discutées plus en détails dans le Guide méthodologique 2007.

V.8 Synthèse

V.8.1. Hypothèses de modélisation

Le tableau ci-dessous synthétise les hypothèses majeures pour chaque plastique étudié.

Matériau	Unité fonctionnelle	Application dans laquelle la matière recyclée est utilisée	Matière substituée	Efficacité du recyclage (moyenne + intervalle entre parenthèses)	Taux de substitution (analyse de sensibilité)
PET	recyclage d'une tonne supplémentaire de PET d'emballage en France	Bouteille en PET recyclé	PET vierge	92 % (89-95 %)	1 (0,9-1)
PEHD	recyclage d'une tonne supplémentaire de PEHD d'emballage en France	Tuyau en PEHD recyclé	PEHD vierge	90 % (85-95%)	0,9 (0,7-0,9)
PEBD	recyclage d'une tonne supplémentaire de film de palettisation en France (film étirable).	Sac poubelle en PEBD recyclé	PEBD vierge	90 % (85-95%)	0,9 (0,7-1)
PVC	recyclage d'une tonne supplémentaire de châssis de fenêtre en PVC en France.	Châssis de fenêtre en PVC recyclé	PVC vierge	96,5 % (95-98 %)	0,8 (0,7-0,9)
PS thermoformé	Recyclage d'une tonne supplémentaire de PS thermoformé	Etagère en PS recyclé	Bois	85% (80-90%)	Volume : 1 Poids : 0,5-0,8)
ABS	Recyclage d'une tonne supplémentaire d'ABS	Enveloppe de téléviseurs à écran plat	ABS vierge	85% (80-90%)	0,7 (0,5-0,9)

Tableau 140 : Synthèse – Hypothèses de modélisation

V.8.2. Résultats comparés

V.8.2.1 Résultats moyens

Le tableau ci-dessous présente un récapitulatif des coûts environnementaux externes et totaux du recyclage pour chaque type de plastique. Ces coûts sont un résultat moyen sur base des données fournies et modélisées.

Note : Ces résultats correspondent à une situation donnée déterminée par un grand nombre d'hypothèses ainsi que par le choix de l'application. (Pour rappel, l'évaluation de la durabilité des filières de recyclage a fait l'objet d'une étude de marché et l'approche conséquentielle appliquée pour l'allocation des bénéfices du recyclage se base sur les conclusions de cette étude). L'analyse de sensibilité permet d'évaluer leur robustesse au vu de la variabilité des situations.

Matériau recyclé	Coût environnemental total (€ 2007 / t)	Coût externe (€ 2007 / t)
PET	-1028	-503
PEBD	-746	-354
ABS	-686	-345
PEHD	-623	-284
PVC	-632	-300
PS thermoformé		
Scénario 1	278	162
Scénario 2a	131	103
Scénario 2b	306	191

Tableau 141 : Bilan environnemental du recyclage de tous les plastiques

Notes :

- Un "Coût environnemental total" négatif signifie que le recyclage crée un bénéfice environnemental
- Le "Coût externe" est le coût non supporté (ou le bénéfice non perçu) par les acteurs concernés de la chaîne de recyclage (y compris dans cette chaîne les producteurs de matières vierges substituées)
- Scénario 1 : ressource bois illimitée (la demande n'atteint jamais la capacité de production durable des forêts)
- Scénarios 2 : ressource bois limitée. Son utilisation entraîne indirectement une utilisation accrue de
 - scénario 2a : ressources fossiles
 - scénario 2b : ressources renouvelables

Pour les hypothèses et scénarios envisagés, le recyclage de tous les plastiques, sauf le PS, engendre un bénéfice environnemental substantiel. Si l'on compare les scénarios moyens, on constate que le recyclage du PET génère le plus grand bénéfice environnemental, de l'ordre de 1 000 €/t, alors qu'il est de 600 à 750 €/t pour le PEBD, l'ABS, le PVC et le PEHD.

Le seul cas modélisé pour lequel un plastique ne se substitue pas à la même résine vierge est le polystyrène (le PS recyclé remplace du bois). Dans cet unique cas, le recyclage engendre un coût et non un bénéfice environnemental.

Cela montre bien que le choix du (type de) matériau substitué par la matière recyclée a une influence déterminante sur les résultats.

Les coûts externes représentent de l'ordre de 50 % des coûts environnementaux totaux (car c'est en gros la proportion externalisée pour l'utilisation de ressources et c'est cette catégorie qui domine les coûts totaux) pour tous les plastiques sauf pour le PS (pourcentage plus élevé car l'utilisation de ressources pèse moins lourd en proportion). La part externalisée dépend donc principalement de l'internalisation des coûts de l'énergie (diminution de la contribution de la catégorie d'impacts "consommation des ressources naturelles", qui est la catégorie la plus importante).

V.8.2.2 Analyse de sensibilité

Le taux de substitution a été identifié pour tous les plastiques, sauf pour le PS, comme le paramètre présentant la plus grande influence sur les résultats du bilan environnemental du recyclage. La variabilité de ce paramètre est due soit à une incertitude sur sa valeur réelle, soit à une variété de cas réels (ce taux est fonction de l'application dans laquelle va la matière recyclée, de la performance du procédé de recyclage en termes de qualité obtenue, etc.). Dès lors, il est essentiel de prendre en considération les résultats pour toute une gamme de valeurs et non uniquement pour une valeur fixe du taux de substitution.

Note : Rappel : hypothèse du taux de substitution et polystyrène (cf.V.6.3.1B)

- Lorsque l'on raisonne en volume de bois : 1 → Production de panneaux en bois et utilisation alternative du bois
- Lorsque l'on raisonne en poids de bois : de 0,5 à 0,8 en fonction de la densité du bois (il s'agit du ratio entre la densité du bois et celle du PS) → Fin de vie évitée du bois

Seul le taux de substitution pour la fin de vie évitée est variable. Son influence sur le bilan global est donc très faible.

Le graphique ci-dessous montre que le bénéfice lié au recyclage des plastiques varie considérablement en fonction du taux de substitution de chaque polymère considéré, tout en restant toujours favorable.

Par exemple, quand le taux de substitution varie de 0,5 à 0,9 pour l'ABS, le bénéfice passe de 300 à 1 000 €/t !

Par contre, si l'on considère des applications avec des taux de substitution différents (applications spécifiques), la hiérarchie peut évoluer. Par exemple avec 0,9 pour le PEHD et 0,7 pour le PVC, le recyclage du PEHD présente en moyenne un bilan plus favorable que celui du PVC.

Enfin, le recyclage du PS avec substitution du bois engendre toujours un coût environnemental et non un bénéfice.

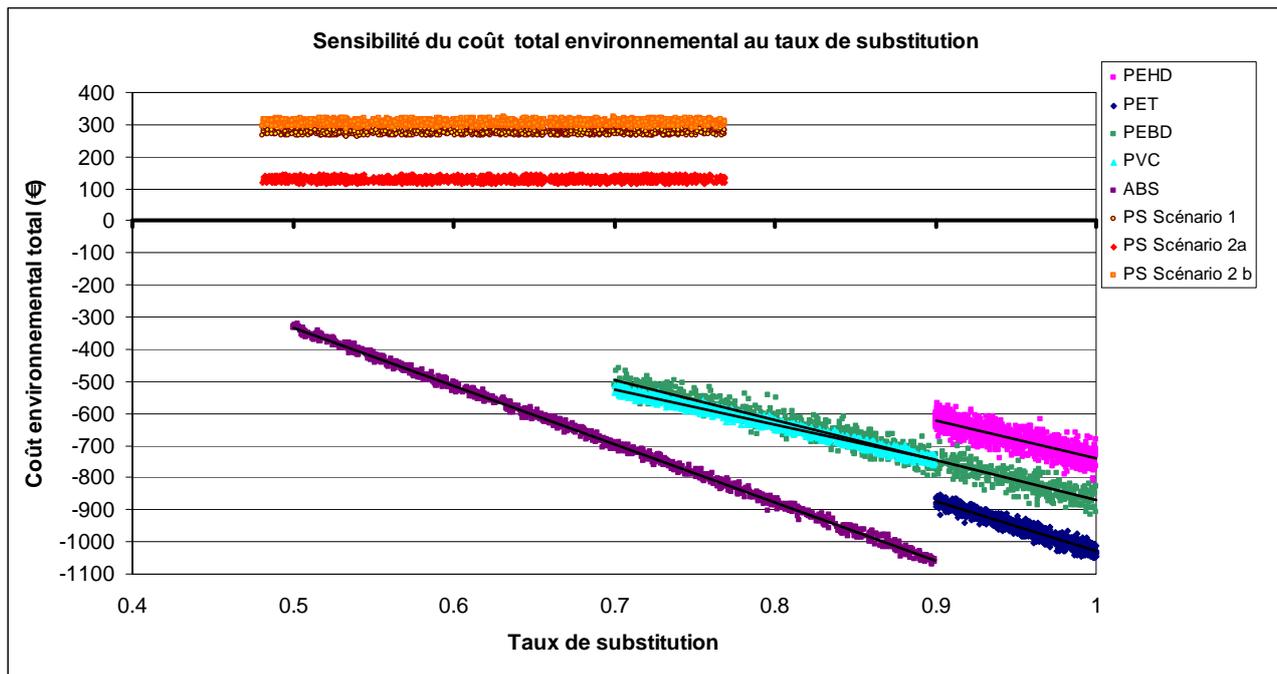


Figure 109 : Recyclage de tous les plastiques - Sensibilité des coûts totaux au taux de substitution

VI. Conclusions

VI.1 Conclusions communes au recyclage des papiers cartons et des plastiques

Catégories d'impacts principales

Le bénéfice environnemental du recyclage des plastiques et des papiers cartons provient essentiellement de la diminution de la consommation de ressources fossiles

La catégorie d'impacts "consommation des ressources naturelles" apporte la plus grande contribution au bénéfice (ou au coût) du recyclage. Ce sont les ressources fossiles qui sont largement dominantes. Viennent ensuite les catégories d'impacts "toxicité humaine"⁸² et ⁸³ et "effet de serre". Les autres catégories d'impacts ne contribuent pas de manière significative au bilan environnemental.

Étapes principales

La production évitée (et l'utilisation alternative de la ressource bois) grâce à l'utilisation du matériau recyclé est déterminante pour définir si le recyclage est bénéfique ou dommageable d'un point de vue environnemental.

Pour les papiers-cartons, le recyclage des papiers cartons génère soit un dommage, soit un bénéfice environnemental selon que la ressource bois a, ou non, une utilisation alternative en substitution d'une ressource fossile.

Pour les plastiques le bénéfice environnemental du recyclage des plastiques provient essentiellement de la non-production de la matière vierge économisée.

Le transport ne contribue que très peu au bilan environnemental.

Cette contribution représente de 1 % à 3 % du bilan global. Elle ne concerne que le transport des matières recyclées mais pas la collecte sélective des déchets à recycler (étape non-incluse dans le champ de cette étude).

Degré d'internalisation des coûts et bénéfices environnementaux

Environ la moitié des coûts (bénéfices) environnementaux totaux sont internalisés.

Les coûts internalisés sont principalement le coût de l'énergie à travers son prix⁸⁴ sur le marché (environ la moitié) et, dans une moindre mesure, le coût des émissions de CO₂ (via le système européen d'échange de quotas). Les autres coûts sont externes : bien que supportés par la société, ils ne sont pas intégrés dans les décisions des acteurs économiques.

⁸² Cette catégorie d'impact est essentiellement issue des procédés de combustion du bois pour le papier et à l'énergie du processus de fabrication des matières vierges pour les plastiques.

⁸³ Bien que cette catégorie soit en général en valeur absolue plus élevée, il est à noter qu'elle est en général un peu moins fiable. En effet, elle est basée sur une analyse qualitative pour les impacts sur la santé humaine. De fortes incertitudes sur les impacts liés à cette catégorie demeurent (évolution des polluants dans la nature, nombre de personnes exposées et durée d'exposition, effet dose-réponse, ...) qui sont très dépendants du lieu d'émission.

⁸⁴ On suppose que le prix de l'énergie reflète sa rareté (on suppose que les coûts d'exploitation du gisement sont négligeables par rapport au coût de la ressource).

La monétarisation de la catégorie d'impacts "effet de serre" influence sensiblement la valeur du bénéfice environnemental

Le facteur de monétarisation de la catégorie d'impacts « effet de serre » influence de façon importante la valeur du bénéfice environnemental. Des objectifs ambitieux de réduction des gaz à effet de serre (coût marginal de la tonne de CO2 plus élevé) augmentent l'intérêt du recyclage.

Le coût externe varie en fonction de l'intégration de tous les gaz à effet de serre au protocole de Kyoto et l'intégration ou non de tous les secteurs. L'internalisation de tous les gaz à effet de serre (et non le seul CO2) influence faiblement la valeur du bénéfice environnemental du recyclage.

VI.2 Recyclage des papiers cartons

Note :

Les couples « matériau récupéré / application pour le matériau recyclé » choisis dans cette étude sont une représentation des tendances actuelles ; ce sont les plus représentatifs de chaque type de papier carton récupéré. Cela ne veut pas dire que le papier carton récupéré en question n'aurait pas pu être utilisé dans une autre application, avec un bilan environnemental différent.

Les résultats d'un couple « Papier Carton Récupéré /Application » ne doivent donc être généralisés ni à l'ensemble des débouchés d'un papier carton recyclé, ni à l'ensemble des Papiers Cartons Récupérés utilisables pour une application.

Bilan environnemental global

Rappelons ici que ces conclusions sont valables pour évaluer des effets à suffisamment :

- petite échelle pour ne pas perturber les équilibres des marchés. Ainsi, en l'absence de tout recyclage, l'intégralité de l'offre mondiale de bois ne pourrait subvenir à la demande de l'industrie papetière. Dès lors, les résultats de l'étude doivent être considérés pour des variations d'ampleur limitée,
- long terme pour que les marchés aient le temps de s'adapter. En effet, des changements très rapides pourraient se heurter à des problèmes d'adaptation à court terme des marchés (capacité de transport, de traitement alternatif...), le temps par exemple que des investissements soient réalisés.

Le recyclage des papiers cartons génère soit un dommage, soit un bénéfice environnemental selon que la ressource bois a, ou non, une utilisation alternative en substitution d'une ressource fossile.

Suivant l'état du marché du bois, l'utilisation du bois non-consommé grâce au recyclage varie beaucoup :

- Lorsque la ressource bois est « illimitée », le bois libéré grâce au recyclage n'est pas utilisé. Dans ce cas, l'impact du recyclage est variable, celui-ci étant influencé par :
 - Le différentiel de consommations d'énergie et de composés chimiques mis en œuvre dans le procédé de recyclage et de production à partir de matière vierge,
 - Du bénéfice environnemental généré par la fin de vie évité. L'incinération engendre une production d'énergie qui n'est pas produite lorsque le papier carton récupéré est recyclé. En outre, le recyclage, en réduisant la consommation de matières premières vierges (bois), réduit l'exploitation de la forêt et donc sa capacité à fixer le CO2 biogénique.

- La ressource bois peut se substituer à des sources fossiles pour produire de l'énergie. Le recyclage des Papiers Cartons Récupérés engendre alors un bénéfice environnemental substantiel (Scénario 2a),
- La ressource bois peut se substituer à d'autres énergies renouvelables; dans ce cas, le recyclage génère un dommage environnemental (scénario 2b) ! En effet, l'impact environnemental de l'utilisation préférentielle de biomasse au détriment d'autres énergies renouvelables est négative, la filière bois énergie engendrant d'importantes émissions de particules et d'oxydes d'azote.

Connaître précisément la situation de marché est donc indispensable pour bien évaluer l'intérêt de favoriser le recyclage. En effet, ce paramètre est suffisamment influent pour inverser des tendances. Suivant le scénario, le recyclage peut engendrer soit un bénéfice environnemental soit un coût.

Le rendement du procédé de recyclage (lié au type de Papier Carton Récupéré et au produit recyclé) ainsi que le type de pâte à papier substitué influence significativement le dommage ou le bénéfice environnemental.

Les paramètres ayant une influence importante sur les résultats finaux sont :

- ⇒ les rendements des procédés de recyclage : par exemple, le recyclage des cartons ondulés, avec un rendement de 90 à 94 %, génère un bénéfice environnemental (cas où la ressource bois est illimitée) de l'ordre de 200 €/t plus élevé que le recyclage des papiers de bureau en papier sanitaire (avec un rendement de 55 à 65 %). Voir Figure 66.
- ⇒ la pâte à papier substituée. Les pâtes thermomécaniques consomment beaucoup d'électricité (broyage) mais peu de bois (elles utilisent la lignine), alors que les pâtes kraft ont des plus grands besoins en bois (elles n'utilisent que les fibres) mais sont moins gourmandes en électricité.

Ces deux paramètres sont liés au type de papier recyclé produit et au type de Papier Carton Récupéré utilisé.

Phases principales

Quand le bois non-consommé est utilisé en substitution d'une ressource fossile (énergie renouvelable), le bénéfice (coût) environnemental du recyclage des papiers cartons provient essentiellement de cette substitution. Le recyclage d'une tonne de papier carton récupéré permet alors de préserver les ressources naturelles non renouvelables.

La deuxième phase engendrant le plus de bénéfice environnemental (cas d'une substitution à une ressource fossile) est la production évitée de pâte vierge.

Le coût environnemental de la production de chaleur à partir de bois (cas d'une substitution à une source d'énergie renouvelable) est plus élevé qu'une production à partir de panneaux solaires thermiques. Les émissions de particules et d'oxydes d'azote lors de la combustion du bois sont la cause de ce coût environnemental plus élevé.

Le procédé de recyclage en lui-même génère généralement un dommage environnemental légèrement plus élevé que celui de la production évitée.

Dans le cas des pâtes kraft, les consommations d'énergie du recyclage de PCR sont généralement plus élevées que celles d'une production à partir de matière vierge. Cette situation s'inverse si l'on considère les pâtes thermomécaniques.

Influence des paramètres variables

Le bénéfice (coût) environnemental du recyclage est proportionnel au rendement du procédé de recyclage.

Le rendement du procédé de recyclage joue un rôle important puisqu'il influence directement les quantités de bois rendues disponibles grâce au recyclage, ainsi que les consommations liées à la production évitée.

Lorsque la fin de vie évitée consiste en une incinération à haut rendement, le bénéfice (coût) environnemental du recyclage diminue (augmente).

En effet, l'incinération des papiers cartons permet de récupérer une partie de l'énergie contenue dans la matière et ainsi d'éviter de recourir à des ressources fossiles (ou nucléaires) pour produire cette énergie. Dès lors, plus ce scénario alternatif au recyclage permet de produire de l'énergie (plus le rendement de l'incinération est élevé), moins le recyclage sera bénéfique pour l'environnement (ou plus il sera impactant).

NB : Pour rappel, le coût (ou comme ici le bénéfice) de la fin de vie alternative – et donc évitée grâce au recyclage – est déduit du bénéfice du recyclage.

Variantes

Le choix du mix électrique du pays de la production évitée peut jouer un rôle important, en particulier dans le cas des pâtes thermomécaniques. En effet, leur production engendre d'importantes consommations électriques dont les impacts environnementaux diffèrent sensiblement selon le mix électrique du pays de production. Ce mix électrique joue un rôle beaucoup moins important dans le cas des pâtes kraft beaucoup moins consommatrices d'électricité.

VI.3 Recyclage des plastiques (dérivés de ressources fossiles)

Bilan environnemental global

Le recyclage des plastiques engendre un bénéfice environnemental substantiel (600 à 1 000 €/t) quand la matière recyclée se substitue à de la matière vierge de la même résine.

Le tableau ci-dessous récapitule le coût environnemental total pour les différents plastiques étudiés.

Ces valeurs sont le résultat d'un certain nombre d'hypothèses de modélisation qu'il est important de garder à l'esprit.

Matériau recyclé	Coût environnemental total (€ 2007 / t)
PET	-1028
PEBD	-746
ABS	-686
PEHD	-623
PVC	-632
PS thermoformé	de 131 à 306

Cf. Tableau 141, p.222

Note : Un "Coût environnemental total" négatif signifie que le recyclage crée un bénéfice environnemental

Le recyclage des plastiques peut engendrer un dommage environnemental quand la matière recyclée se substitue à une autre matière (bois). C'est le cas du polystyrène recyclé lorsqu'il se substitue au bois. C'est dans ce cas seulement que le recyclage des matières plastiques étudiés engendre un coût environnemental (de 130 à 300 €/t).

La nature du matériau substitué a donc une influence déterminante sur le bilan environnemental du recyclage.

Le taux de substitution influence significativement le bénéfice environnemental.

Comme le bénéfice environnemental du recyclage des plastiques (dans le cas d'une substitution à un plastique vierge) est essentiellement lié à l'économie de production de cette matière vierge, le bénéfice est plus ou moins proportionnel au taux de substitution (ratio du poids de matière vierge évitée et du poids de la matière recyclée).

Phases principales

Le bénéfice environnemental du recyclage des plastiques provient essentiellement de la non-production de la matière vierge économisée.

La deuxième phase engendrant le plus de bénéfice environnemental est l'évitement de la mise en œuvre de la matière première vierge dans l'application initiale considérée par l'étude.

Les principales phases qui génèrent un coût environnemental sont le procédé de recyclage et la mise en œuvre de la résine recyclée.

Pour le PET, le PEHD et le PEBD, c'est le procédé de recyclage qui est le plus impactant, tandis que pour le PVC et l'ABS c'est la mise en œuvre de la résine recyclée dans son application.

Notons que les impacts environnementaux de la mise en œuvre de la matière recyclée sont très similaires à ceux de la mise en œuvre de la matière vierge. La résultante est donc généralement faible et s'annule même lorsque le taux de substitution est égal à 1.

Influence des paramètres variables

Le bénéfice environnemental du recyclage est proportionnel au taux de substitution

Le taux de substitution est l'élément qui fait le plus varier les résultats des bénéfices environnementaux. Le bénéfice est plus ou moins proportionnel au taux de substitution car l'économie de matière vierge, qui est la phase principale, est proportionnelle au taux de substitution (voir conclusion 16).

NB : Le taux de substitution est le rapport entre la quantité de matière remplacée et la quantité de matière recyclée nécessaire pour la remplacer.

NB2 : dans le cas du polystyrène, le taux de substitution est de 1 en volume et ne varie pas.

Lorsque la fin de vie évitée consiste en une incinération à haut rendement, le bénéfice environnemental du recyclage est moindre. En effet, l'incinération des plastiques permet de récupérer une partie de l'énergie contenue dans le plastique et ainsi d'éviter de recourir à des ressources fossiles (ou nucléaires) pour produire cette énergie. Dans le cas du

PEHD, augmenter de 10 % le rendement de l'incinération génère une réduction du bénéfice environnemental de 28 % environ.

NB : Pour rappel, le coût (ou comme ici le bénéfice) de la fin de vie alternative – et donc évitée grâce au recyclage – est déduit du bénéfice du recyclage.

Variantes

Le choix du mix électrique (conséquentiel ou moyen) n'a que peu d'incidence sur les résultats.

Les écarts entre le cas de base (mix conséquentiel) et la variante (mix moyen) restent inférieurs à 5 % des bénéfices et ne changent pas les conclusions.

VII. ANNEXES

Annexe 1 : Les marchés des plastiques recyclés



Monétarisation des bénéfices environnementaux du recyclage

Les marchés des plastiques recyclés

Fiches détaillées

24 septembre 2008

PolyÉthylène téréphtalate (PET)

Le PET que nous étudions plus spécifiquement provient des bouteilles usagées.

Le gisement de déchets

Consommation mondiale de PET : 11 à 12 MT dont 3 Mt en Amérique du nord, 3 Mt en Europe et 5 à 6 Mt dans les autres pays.

Gisement total de bouteilles PET usagées (Europe): 3 200 kt

Tonnage collecté (Europe) : 916 kt (2007)

Les flux collectés sont triés selon leur couleur (vert, bleu, incolore) après séparation des flacons en HDPE. La répartition des déchets par couleur, très variable selon les pays, est estimée à environ 40-45 % pour le PET incolore, 30-35 % pour bleu et 20-25 % pour les autres couleurs.

Les débouchés du PET recyclé

Le marché des fibres a longtemps été le principal débouché du recyclage des bouteilles usagées en PET, pour des applications diversifiées, essentiellement des anoraks, manteaux, sacs de couchage et jouets en peluche...). Les fibres plus fines sont tissées en vêtements « polaires », pulls, bonnets, gants.... Le PET encollé au filage ou non-tissé est destiné à la fabrication de chaussures légères, de sacs à dos et de parapluies. Enfin, les fibres PET sont également utilisées pour la fabrication d'accessoires internes pour automobiles (tapis de sols,...) ainsi que pour des tapis et « rugs » pour les intérieurs. Des applications à plus forte valeur ajoutée commencent également à se développer (vêtements en Gore-Tex).

Les feuilles épaisses (demi-produits pour les préformes de bacs en plastique : bacs à fruits, boîtes à oeufs) et les rubans de cerclage constituent également des débouchés significatifs pour le PET recyclé.

Les feuilles pour thermoformage en PET (300 à 500 microns d'épaisseur) constituent un débouché en plein développement. Le procédé de fabrication, plus « court » que celui des préformes pour bouteilles, conduit à des coûts d'exploitation avantageux. D'autre part, il s'agit d'une application à forte valeur ajoutée (barquettes alimentaires) et à prix de vente élevé.

Le marché des bouteilles PET (en boucle fermée) à base de recyclé s'est d'abord développé aux USA. En Europe, du fait de l'absence de cadre réglementaire relatif aux applications des produits recyclés en contact avec des produits alimentaires, l'usage du recyclé a longtemps été limité à des applications du type flacons pour produits d'hygiène (savon liquide,...). Suite à la directive européenne récente, plusieurs pays européens ont donné leur accord à l'usage du PET recyclé pour des applications emballages alimentaires. En France, l'AFSSA (Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliments) a précisé en 2008 les conditions d'utilisation de matériaux PET recyclés. Suite à cette décision, deux conditionneurs d'eau minérale français, Evian et Vittel, ont fait connaître leur intention d'introduire 25 % de PET recyclé dans leurs bouteilles. D'autre part, un conditionneur anglais de boisson sucrée lance en France une bouteille avec du PET recyclé. **On devrait donc assister à un décollage du marché du recyclage en boucle fermée.** Le recyclage en boucle

fermée suppose toutefois le respect de conditions très strictes sur l'origine et sur la qualité du gisement de PET ainsi que sur son mode de collecte. Le taux de substitution par rapport à la matière vierge est compris entre 0,9 et 1.

Les technologies de recyclage

Le recyclage « basique » (tri + broyage + lavage éventuel) permet d'obtenir des paillettes (flakes) utilisables pour la plupart des applications sans contact alimentaire (rembourrage, flacons de détergents,...).

A partir des paillettes, plusieurs procédés permettent de fabriquer des granulés aptes aux applications avec contact alimentaire, notamment des bouteilles pour boissons. Il s'agit en particulier des procédés de polycondensation en phase solide (Supercycle) et des procédés basés sur l'extrusion/réaction à 200°C (URCC, RMA,...). Dans les deux cas, on obtient des granulés d'une grande pureté, dont les qualités sont quasiment identiques à celles de la résine vierge (contrairement au polyéthylène, le taux de migration des bouteilles recyclées en PET est en effet du même ordre que celui du verre).

Les procédés de glycolyse et de méthanolyse (retour au monomère) sont extrêmement coûteux. Ils ne sont pas utilisés au stade industriel.

L'équilibre offre-demande de déchets

La demande des pays d'Asie pour du PET recyclé en paillettes destiné au rembourrage de vêtements et literie a longtemps tiré les prix du recyclé vers le haut. Le développement rapide des débouchés des feuilles pour thermoformage (segment le plus dynamique de la demande de PET recyclé) a profondément modifié le contexte au cours des trois dernières années. A court-terme, le marché des bouteilles pour boissons devrait également décoller du fait de la clarification des contraintes réglementaires.

Malgré l'augmentation significative de l'offre de déchets PET au cours des dernières années suite au développement des opérations de collecte de bouteilles usagées, on observe un déficit croissant en déchets et une tension de plus en plus forte dans les pays industrialisés. Cette situation devrait perdurer, voire s'intensifier, même si la collecte du gisement de bouteilles usagées continue à se développer (aux USA, le taux de collecte n'est que de 22 %). A moyen terme, il est peu probable que le marché du recyclé arrive à saturation car un nombre croissant d'applications (dont les feuilles pour thermoformage et les bouteilles pour boissons) peut être réalisé à base de PET recyclé.

Les produits recyclés à base de PET et leurs débouchés

Produits		Fibre de rembourrage	Bouteilles à usage alimentaire	Flacons à usage non alimentaire, strapping,...	Feuilles pour thermoformage	Divers (arrosoirs, poubelles,...)	Produits moulés (pôts, plateaux, automobile, EEE)
Principaux déchets utilisés		Bouteilles PET					
Type de boucle		Ouverte	Fermée	Ouverte	Ouverte	Ouverte	Ouverte
Part (%) du recyclé dans les produits	Actuelle	Jusqu'à 100%	Monocouche : 25% (Multi-couches : 40%)	25 à 40%	80 à 90%	100%	
	Maximale théorique	100%	70%, voire 100%		100% (procédé SSP)	100%	
Demande totale actuelle de produits (X1000 tonnes)	Vierge	100 kt	1700 t				
	Recyclé	500 kt	70 kt	140 kt	120 kt	Faible	25 kt
Evolution probable de la demande de produits (% annuel)	Vierge	Stagnation	Forte croissance				
	Recyclé	En diminution du fait de concurrence des autres applications.	Forte croissance La part du PET recyclé dans les bouteilles (alim. + non alim.) recyclées pourrait atteindre 8 à 10% rapidement.		Forte croissance	Produits à faible valeur ajoutée	Le marché est demandeur car il s'agit de produits à forte VA

Note : Au plan technique, rien ne s'oppose à une utilisation accrue des déchets de PET pour des applications du type "RDF". Toutefois, pour que cette application soit viable au plan économique, il faudrait utiliser en priorité des fractions contenant du PET non trié. En outre, pour les applications "RDF", les plastiques sont fortement concurrencés par de nombreux types de déchets non plastiques. Les débouchés ne sont donc pas assurés.

Facteurs de développement des produits recyclés à base de PET

Produits	Fibre de rembourrage	Bouteilles à usage alimentaire *	Flacons à usage non alimentaire, strapping,..	Feuilles pour thermoformage	Divers (arrosoirs, poubelles,..)	Produits moulés (pots, plateaux, automobile, EEE)
Principales contraintes liées au recyclage	Seul le PET transparent est utilisable.	Seul le PET transparent est utilisable.	Possibilité d'utiliser du PET coloré			Seul le PET transparent est utilisable.
Facteurs influençant la demande	Prix de la ouate naturelle de coton	Prix du PET vierge.				
		Image des produits recyclés				
Qualité (grade) de la résine recyclée utilisée		Le taux d'impuretés maximum dans les paillettes destinées au recyclage est de 20 à 100 ppm selon les applications visées (le PVC est un « poison »). Le procédé de polycondensation (type « Supercycle » permet d'atteindre une pureté et des propriétés équivalentes au PET vierge, mais il est très gourmand en énergie				
Restrictions légales pour l'incorporation de résine recyclée dans certains usages	Non	voir ci-dessous	Non	Non	Non	Non
	La directive 282-2008/EC relative à l'utilisation des matières plastiques recyclées pour les emballages avec contact alimentaire définit un cadre précis (jusqu'alors, les législations étaient différentes selon l'Etat-Membre) et lève l'obstacle à l'utilisation de recyclé. Les bouteilles en PET peuvent contenir du recyclé, sous réserve de respecter de conditions strictes de qualité et de traitement des déchets.					
Matériaux en concurrence avec la résine recyclée	Coton	(Verre, acier), PET vierge	PP, PET vierge	PS, PVC, PVC/PE, PET vierge	LDPE, HDPE	ABS, PET vierge
Localisation des « sources » du recyclé	Union Européenne, USA, Japon.					
Localisation des débouchés du recyclé	Croissance en Asie et en Afrique du nord. Diminution en Europe.	Union européenne, USA, Japon	Forte dispersion géographique des débouchés			Pays d'implantation d'équipementiers du secteur automobile

Produits	Fibre de rembourrage	Bouteilles à usage alimentaire *	Flacons à usage non alimentaire, strapping,..	Feuilles pour thermoformage	Divers (arrosiers, poubelles,..)	Produits moulés (pots, plateaux, automobile, EEE)
Facteurs directeurs des prix du marché	Prix du PET : Vierge : 1 500 €/t Recyclé : 1 150 €/t Prix de reprise des bouteilles et flacons (2008) : 200 / 250 €/t					
Motifs d'achat de recyclé au lieu de matière vierge	Au plan mondial, déficit de l'offre de vierge par rapport à la demande de PET	Image (les consommateurs sont demandeurs de bouteilles contenant du recyclé)			Prix du recyclé	
	Au plan mondial, il y a un excédent d'offre de PET vierge par rapport à la demande. Au plan européen la situation est inverse. La demande de PET vierge est supérieure à l'offre. Il y a donc une plus forte tension sur les prix du vierge en Europe, ce qui contribue à favoriser la substitution vers le recyclé.					
Mécanismes / facteurs de choix du passage d'un matériau à un autre *. Freins à ce type de substitution						

Note : Pour les applications « filament » (tissage) soit un marché de 700 kt / an en Europe, le PET recyclé n'est pas utilisable en remplacement du vierge. Les fabricants de chemises, pantalons,...sont réticents à utiliser du PET recyclé.

PolyEthylène basse densité (PEBD)

Le PEBD que nous étudions plus spécifiquement provient des films de distribution et des films agricoles

Le gisement de déchets de films PEBD

Gisement total de déchets de film LDPE (Europe) : 2 650 kt

- dont thermorétractable : 650 kt
- dont étirable : 1 400 kt
- sacs : 300 kt
- film agricole : 300 kt

Le taux de collecte atteint 45 % en moyenne.

Les flux de déchets de film PEBD sont généralement triés et séparés en cinq fractions différentes en vue de leur recyclage :

- thermo-rétractable épais, propre
- thermo-rétractable fin, nécessitant un lavage, transparent
- thermo-rétractable fin, nécessitant un lavage, coloré
- étirable, nécessitant un lavage tout dépend des produits emballés (par exemple, la poudre de lait donne une odeur désagréable à cause de la fermentation)
- étirable, propre (il s'agit de déchets de transformation en grande majorité).

Environ 60 % des films de palettisation collectés sont constitués de films étirables. Ces films sont très fins et fréquemment pollués et sont donc beaucoup plus délicats à recycler que les films thermorétractables. En outre, du fait de leur porosité, ils accumulent une proportion élevée d'humidité lors du lavage, provoquant une consommation élevée d'énergie pour le séchage (surface à sécher importante) (toutefois certains recycleurs ont trouvé des moyens pour sécher, dans des broyeurs, avec peu d'énergie) ainsi qu'une hétérogénéité des points de fusion des granulés. Les recycleurs sont assez réticents à les utiliser. Les 40 % restant sont constitués de films thermorétractables, dont 80 % nécessite un lavage avant recyclage.

Les films agricoles peuvent contenir jusqu'à 80 % de stériles (terre, cailloux).

Les débouchés du PEBD recyclé

Le principal débouché du PEBD recyclé est constitué, de très loin, par le marché des sacs poubelles.

Pour l'application « film de palettisation rétractable », les produits contenant du PEBD recyclé présentent des caractéristiques mécaniques moins bonnes que ceux fabriqués à partir de résine vierge, en particulier au niveau du maintien statique et dynamique. Pour compenser ces différences, il est nécessaire de prévoir des épaisseurs plus élevées, de l'ordre de 180 microns (contre 125 microns dans le cas de la résine vierge). D'autre part, le film se rétracte beaucoup moins bien et le produit est moins transparent (couleur légèrement laiteuse). Enfin, le produit à base de recyclé est vendu à un prix plus élevé que le produit à base de résine vierge. Pour toutes ces raisons, l'usage de recyclé est très peu développé pour la fabrication de film rétractable. Il existe toutefois des perspectives de développement sur ce segment. Le taux de substitution par rapport à la matière vierge est compris entre 0,6 et 0,8.

Pour l'application « film de palettisation étirable », le recyclé n'est pas du tout utilisé.

L'équilibre offre-demande de déchets

Jusqu'au début des années 2000, l'offre de PEBD recyclé issu de film usagé était supérieure à la demande de produits recyclés. Cette situation s'est progressivement inversée sous l'effet de deux facteurs:

- la diminution tendancielle de l'épaisseur des films rétractables. On est passé d'environ 100 à 150 microns d'épaisseur au début des années 90 à 40 à 50 microns aujourd'hui. Il en résulte une diminution de l'efficacité de la collecte et du recyclage ;
- le fait que les films étirables de très faible épaisseur (parfois 15 microns d'épaisseur) ont gagné des parts de marché. Le ratio étirable / rétractable est passé de 40/60 à 70/30 en quelques années. Cette évolution est cruciale car la contamination des flux est en gros proportionnelle à la surface : pour les films très fins, la proportion de contaminants par rapport au poids du film est plus élevée.

D'autre part on assiste à une augmentation des débouchés des produits recyclés en PEBD. La qualité moyenne des produits recyclés s'est nettement améliorée grâce aux innovations en matière de technologies de recyclage et de produits à base de recyclé : film agricole, film pour la construction, applications spécifiques telles que les films composites (PA/PE) à effet anti-microbien pour les serres (30 microns d'épaisseur contre 90 microns pour le PEBD vierge), films composites barrière.....

Conclusion

La demande de résine recyclée issue de déchets de film de distribution en PEBD est supérieure à l'offre car, d'une part, la disponibilité en déchets de qualité s'est réduite et d'autre part la matière recyclée peut se substituer à de la matière vierge dans beaucoup d'applications. Cette tendance devrait s'accroître. Les recycleurs espagnols, en particulier, font de gros efforts pour « tirer » la qualité des applications vers le haut. Le marché sera donc de plus en plus tendu. Toute action visant à augmenter l'offre en matière recyclée aura pour effet d'augmenter d'autant la quantité de matière recyclée et donc d'économiser la même quantité de matière vierge.

Les produits recyclés issus des films PEBD usagés et leurs débouchés

Produits		Sacs poubelles	Film agricole, film construction, tuyaux d'arrosage (type goutte à goutte)	Tuyaux pour la construction	Sacs épais	Film de palettisation	Produits moulés par « extrusion/compression/moulage* ..)
Type de boucle		Ouverte	Ouverte	Ouverte	Ouverte	Fermée	Ouverte
Déchets utilisés		-Film rétractable -Film agricole -Film étirable -Sacs épais -Film emballage alimentaire	-Film rétractable -Sacs -Film agricole -Film étirable -Film emballage alimentaire	-Film rétractable -Film étirable -Sacs -Film emballage alimentaire	-Film rétractable -Film agricole -Sacs	- Film étirable propre (pour l'étirable recyclé)	-Film rétractable -Film emballage alimentaire
Part (%) du recyclé dans les produits	Actuelle	60 à 100 %	15 % Uniquement pour le film de paillage.	5 à 10 %	10 à 30 %	<3 %	
	Maximale théorique	100 %	Principalement pour les films de paillage. Peu de recyclé dans les films tunnel et de serre	30 %	Essais réalisés jusqu'à 80 % de recyclé mais nombreux problèmes de qualité (couleur, texture)	Faible	
Demande totale actuelle de produits (Europe, 1000 tonnes)	Vierge	100 kt	Agricole : 380 kt Construction : 240 kt	300 kt	250 kt	2 000 kt	
	Recyclé	550 kt	50 kt	10 kt	5 kt	3 kt	

Produits		Sacs poubelles	Film agricole, film construction, tuyaux d'arrosage (type goutte à goutte)	Tuyaux pour la construction	Sacs épais	Film de palettisation	Produits moulés par « extrusion /compression /moulage * ..)
Evolution probable de la demande de produits (% annuel)	Vierge	+ 1 %	+3 %	+5 %	0 %	+2 %	+5 %
	Recyclé	Marché saturé en Europe Marché à forte croissance dans les pays émergents		Demande en forte croissance dans les pays émergents			

* Le film étirable ne peut pas être fait avec du recyclé (il passe difficilement dans les machines car épaisseur trop faible).

De même, le film rétractable ne contient pas de recyclé sinon il perd en partie sa rétractabilité et cela pose des problèmes lors de la palettisation dès lors que le chauffage n'est pas parfaitement uniforme.

Facteurs de développement des produits recyclés à base de PEBD

Produits	Sacs poubelles	Film agricole	Film pour la construction	Sacs épais	Film de palettisation	Produits moulés par extrusion/compression/moulage*)
Principales contraintes liées au recyclage	<p>La résistance mécanique (déchirement, poinçonnement) est bonne.</p> <p>Par contre, les résistances à la rupture et à l'allongement dépendent beaucoup de la qualité de la mise en œuvre.</p> <p>Il faut un minimum de radicalaire (rétractable) pour avoir de bonnes caractéristiques physiques de percement.</p>	<p>Environ 50 % des films agricoles sont très pollués (terre, pesticides,...) et nécessitent des moyens de préparation adéquats.</p>	<p>Pollution (gravats, ...)</p>		<p>Contraintes techniques liées à la couleur et à la résistance mécanique.</p> <p>Les déchets < 25 microns d'épaisseur (étirables) posent trop de problèmes.</p> <p>Le rétractable et l'étirable doivent être préalablement séparés.</p> <p>Les déchets de film rétractables perdent leur « rétractabilité » au recyclage.</p>	
Facteurs influençant la demande	<p>Prix résine vierge Image du produit (parfois)</p>			<p>Développement des sacs papier</p>	<p>- Prix résine vierge - Répartition du marché entre thermorétractable et étirable</p>	<p>- Prix du papier, du caoutchouc. - Prix des plastiques mélangés recyclés</p>
Qualité (grade) de la résine recyclée utilisée	<p>Faible (il faut toutefois respecter les critères mécaniques exigés)</p>	<p>Moyenne</p>	<p>Elevée</p>	<p>Elevée</p>	<p>Elevée</p>	<p>Elevée</p>
Restrictions légales pour l'incorporation de résine recyclée dans certains usages	<p>Non</p>	<p>Non</p>	<p>Oui</p>	<p>Non</p>	<p>Non</p>	

Produits	Sacs poubelles	Film agricole	Film pour la construction	Sacs épais	Film de palettisation	Produits moulés par extrusion/compression/moulage*)
Matériaux en concurrence avec la résine recyclée	PEHD (minoritaire)	(paille), PEBD vierge	PP, PEBD vierge	Papier	PEBD vierge	-Plastiques mélangés -Elastomères - PEBD vierge
Localisation des « sources » du recyclé	<p>Les gisements de film usagé en PEBD sont très dispersés géographiquement.</p> <p>Les films de palettisation usagés sont générés principalement dans les grands bassins de consommation.</p> <p>En Europe, l'Italie et l'Espagne ont largement développé le recyclage des films agricoles usagés.</p> <p>La fabrication de sacs poubelles à base de recyclé (principal débouché des films PEBD usagés) fait l'objet d'un processus de délocalisation accéléré vers la Chine.</p> <p>Depuis quelques années, la demande de film PEBD usagé en provenance de Chine a fortement augmenté. Néanmoins, cette demande devrait plafonner, voire ralentir, dans la mesure où la Chine impose des contraintes de plus en plus sélectives en matière de qualité de déchets importés (l'Europe expédie de plus en plus de broyé au lieu de déchets triés).</p>					
Localisation des débouchés du recyclé	La consommation, longtemps limitée aux pays industrialisés, s'étend rapidement aux pays émergents.					
Facteurs directeurs des prix du marché	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Prix de la résine LDPE ex film agricole</u>: Vierge : 1 350 €/kt / Recyclé : 900 €/t • <u>Prix de la résine LDPE ex film de distribution thermorétractable</u> : Vierge : 1350 €/t / Recyclé : 900 €/t <p><u>Prix de la résine LDPE ex film de distribution étirable</u>: Vierge : 1 200 €/t / Recyclé : 700 €/t</p> <p>Principales composantes du prix des résines vierges : 1/ : coût du gaz naturel / naphta (matière première) ; 2/ : coût de l'énergie.</p> <p>Les prix du recyclé évoluent en fonction du prix de la résine vierge.</p>					
Motifs d'achat de recyclé au lieu de matière vierge	Prix Image	Prix	Prix	Image Prix	Prix	Prix
Mécanismes / facteurs de choix du passage d'un matériau à un autre. Freins à ce type de substitution	Principalement les prix relatifs.					

Souvent en mélange avec des élastomères, du noir de carbone,... afin d'améliorer les performances : blocs autobloquants séparateurs de trafic pour les routes, produits pour le jardin, murs anti-bruit, chaussures, grosses pièces de drainage, composteurs,

PolyEthylène haute densité (PEHD)

Le gisement de déchets

Gisement total de déchets PEHD potentiellement recyclables (Europe de l'ouest) : 3 200 kt

dont :

- bidons et fûts : 800 kt
- cageots, caisses, palettes et boites : 600 kt
- tuyaux : 120 kt
- sacs : 300 kt
- bouchons, fermetures : 180 kt
- bouteilles et flacons (lait, détergents,..) : 1 200 kt

Les débouchés du PEHD recyclé

Les débouchés prépondérants des résines recyclées à partir de déchets de PEHD sont les tuyaux pour la construction (et dans une moindre mesure pour l'agriculture) et les cageots, caisses et palettes. Globalement, le marché des produits recyclés en PEHD dépend à 80 % du secteur du bâtiment. Les débouchés sont très sensibles aux fluctuations conjoncturelles de ce secteur. Dans le cas des tuyaux pour la construction, Le taux de substitution par rapport à la matière vierge est compris entre 0,7 et 0,9.

D'autre part, dans toutes les applications actuelles, les propriétés du HDPE recyclé sont inférieures à celles du HDPE vierge. L'origine du HDPE influence les caractéristiques du HDPE recyclé. Par exemple, aux USA ou en Grande-Bretagne, les corps creux obtenus par collecte sélective permettent de refabriquer des bouteilles car ils sont transparents. Dans la plupart des autres pays, les contraintes de couleur limitent le marché à des produits à valeur ajoutée plus faible. Par voie de conséquence les produits recyclés ne nécessitent pas de surdimensionnement par rapport aux produits fabriqués à partir de résine vierge.

L'équilibre offre-demande de déchets

L'équilibre offre-demande de déchets de PEHD fluctue surtout en fonction de la conjoncture dans le secteur du bâtiment. Ainsi, depuis 6 mois, l'offre de déchets a tendance à être supérieure à la demande de produits recyclés car la demande liée au secteur de la construction est en net ralentissement.

Les produits recyclés sont généralement à relativement faible valeur ajoutée, ce qui rend le marché assez fragile, tant en volume qu'en prix de vente.

Structurellement, l'équilibre offre-demande de déchets en vue du recyclage continuera à fluctuer en fonction de la conjoncture, et sera focalisée sur des applications pour lesquelles la recherche de qualité n'est pas fondamentale.

Les produits recyclés à base de PEHD et leurs débouchés

Produits		Bouteilles pour usages alimentaires	Bouteilles et flacons pour usages non alimentaires	Tuyaux pour la construction, conduits de câbles	Poubelles rigides, bidons	Caisses, palettes, pôts	Profilés	Accessoires ménagers (bacs de rangement, étagères, corbeilles,...)
Principaux déchets utilisés		Aux USA et en Grande-Bretagne (à partir de bouteilles transparentes)	Caisses, cageots Tuyaux Accessoires ménagers	Fûts et bidons Bouteilles Accessoires ménagers Bouchons	Caisses, cageots Fûts et bidons Accessoires ménagers	Palettes Fûts Bouteilles Accessoires ménagers Bouchons	Fûts et bidons	Fûts et bidons Bouteilles Bouchons
Type de boucle		Fermée	Ouverte	Ouverte	Ouverte à 95 %	Fermée en majorité, sauf pour les pôts	Ouverte	Ouverte
Part (%) du recyclé dans les produits	Actuelle	0 %	25%	25 % à 100 %	50 %	Casiers : 70 % Pôts : 5 %	25 %	25%
	Maximale théorique	0 %	40 à 50 % (multi-couches)	100 %	Techniquement, jusqu'à 50%, voire 100% de recyclé	100 %	30 %	30%

Produits		Bouteilles pour usages alimentaires	Bouteilles et flacons pour usages non alimentaires	Tuyaux pour la construction, conduits de câbles	Poubelles rigides, bidons	Caisses, palettes, pôts	Profilés	Accessoires ménagers (bacs de rangement, étagères, corbeilles,...)
Demande actuelle totale de produits (X1000 tonnes)	Vierge	300 kt	1 000 kt	Agriculture : 110 kt Construction : 300 kt	1 000 kt	700 kt	200 kt	300 kt
	Recyclé	0 kt	5 kt	25 kt de tuyaux agricoles à partir de fûts et bidons 120 kt de tuyaux pour la construction à partir de fûts et bidons	90 kt (à partir de cageots et palettes)	180 kt (83 % des déchets sont recyclés en boucle fermée, dont 70% des cageots à bouteilles)	25 kt à partir de fûts et bidons principalement	10 kt
Evolution probable de la demande de produits (% annuel)	Vierge	Stable	Croissante					
	Recyclé		Demande en forte croissance. Pour les cageots, caisses et palettes, les contraintes réglementaires d'hygiène favorisent le remplacement du bois par le plastique dans les secteurs alimentaire et des médicaments (Hazardous Analysis Critical Contact Point Norm - HACCP).					

Facteurs de développement des produits recyclés en PEHD

Produits	Bouteilles pour usages alimentaires	Bouteilles et flacons pour usages non alimentaires	Tuyaux et conduits de câbles	Fûts et bidons	Caisses, palettes, pôts	Profilés	Accessoires ménagers (bacs de rangement, étagères, corbeilles,...)
Principales contraintes liées au recyclage	<p>Le gisement de déchets est trop contaminé (shampooing,...).</p> <p>Difficulté d'éliminer les odeurs.</p> <p>Taux de migration élevé.</p> <p>Couleur : bouteilles de lait blanches, bouteilles d'huile jaunes,...</p>	Pas de contraintes significatives	Les tuyaux sous pression ne peuvent pas contenir de recyclé.	<p>Les fûts ayant contenu des produits dangereux ne peuvent pas être recyclés en boucle fermée (risque de pontage moléculaire pendant le recyclage).</p> <p>Peu de recyclé coloré. La majorité des fûts et bidons sont gris ou noirs. Sinon, il faut réaliser du multi-couches.</p>	Couleur		
Facteurs influençant la demande	Spécifications de la demande	Prix du PEHD vierge	<p>Prix du PEHD vierge</p> <p>Prix du PVC vierge</p>	<p>Prix PEHD vierge (le recyclé est peu rentable)</p> <p>Prix du PP vierge</p>	<p>Prix du PEHD vierge</p> <p>Prix du bois</p> <p>Normes d'hygiène</p>	Prix du PEHD vierge	

Produits	Bouteilles pour usages alimentaires	Bouteilles et flacons pour usages non alimentaires	Tuyaux et conduits de câbles	Fûts et bidons	Caisses, palettes, pôts	Profilés	Accessoires ménagers (bacs de rangement, étagères, corbeilles,...)
	Le tri du PEHD collectés doit être fait très soigneusement. La présence d'impuretés dans le recyclé entraîne une forte détérioration des propriétés mécaniques.						
Qualité (grade) de la résine recyclée utilisée	-	Elevée		>5l : (65 % du segment) High MW-PEHD <5l : (35 % du segment) Medium MW-PEHD. Ces grades ne sont ni interchangeables ni mélangeables lors du recyclage.	Elevée (PM précis)	Elevée	
Restrictions légales pour l'incorporation de résine recyclée dans certains usages	Oui	Non	Non	Les recyclats contaminés par des métaux lourds sont interdits d'utilisation.	Non	Non	Non
Matériaux en concurrence avec la résine recyclée	Lait : « bricks » en alu/papier/plastique, PEHD vierge Huile : Verre, PEHD vierge	PEHD vierge, PEBD, PP, PS	PVC	PP, PEHD vierge	Bois PP	PVC, PEHD vierge	PEBD, PEHD vierge
Localisation des « sources » du recyclé	Pays industrialisés						
Localisation des débouchés du recyclé	Pays industrialisés		Pays à fort développement agricole (irrigation,...)	Pays industrialisés		Pays à fort développement de l'habitat	
Facteurs directeurs des prix du marché	Prix de la résine HDPE Bidons et fûts HDPE : Vierge : 1 300 €/t / Recyclé : 800 €/t Bouteilles HDPE : Vierge : 1 400 €/t / Recyclé : 900 €/t						
Motifs d'achat du recyclé au lieu de matière vierge	Prix PEHD vierge						
Mécanismes / facteurs de choix du passage d'un matériau à un autre *	La concurrence inter-matériaux est relativement faible, car le PEHD recyclé occupe des « niches » de marché solides, principalement dans le secteur de la construction. Elle se situe principalement au niveau des corps creux non alimentaires.						
Freins à ce type de substitution							

Polychlorure de vinyle (PVC)

Le gisement de déchets

Gisement total de déchets de PVC (Europe, 2007) : 1 850 kt
dont, par ordre décroissant :

- √ revêtements de sols
- √ films non emballage
- √ emballages rigides (plateaux, pots, boîtes,..)
- √ châssis de fenêtres et autres profilés
- √ câbles
- √ tuyaux

L'activité de recyclage du PVC contenu dans les câbles usagés a fortement diminué depuis cinq ans en Europe, 60 à 70 % des câbles usagés collectés en Europe étant exportés vers l'Asie pour y être recyclés. Les pays asiatiques achètent ces déchets à des prix élevés du fait de leur contenu en cuivre et en aluminium. Dans certains cas, la fraction plastique obtenue après broyage des câbles usagés est soit recyclée en mélange (PEHD + PVC + élastomères) soit valorisée énergétiquement, soit exportée vers l'Asie. D'autre part, le PVC contenu dans les câbles est de plus en plus fréquemment substitué par d'autres matériaux, en particulier du polyéthylène réticulé. Enfin, on note la proportion croissante de charges comme le carbonate de calcium, qui peuvent représenter jusqu'à 80 % du poids du "PVC" dans certains types de câbles.

En dehors des câbles, le tonnage de déchets PVC collectés en vue du recyclage en Europe est de l'ordre de 100 à 150 tonnes / an (correspondant à environ 100 tonnes de PVC effectivement recyclé)..

Les débouchés du PVC recyclé

Les débouchés du PVC recyclé sont de deux types :

- les produits à valeur ajoutée moyenne / élevée : conduits et tuyaux (pour l'agriculture et la construction), revêtements de sols et profilés (en particulier pour fenêtres). Le marché correspondant au segment des fenêtres et volets contenant du PVC recyclé est porteur. Le taux de substitution par rapport à la matière vierge est compris entre 0,7 et 0,9.
- les produits à faible valeur ajoutée : panneaux de signalisation, mobilier urbain, membranes imperméables, murs anti-bruit, souvent en mélange avec d'autres polymères. La majorité des déchets de PVC est en effet très hétérogène (profilés souples, plaques,...) et collectée en mélange avec d'autres matériaux (fils électriques, tuyaux en plomb ou en cuivre, plâtre..) dans le cas des déchets de construction, ou bien mélangés à des gravats et des papiers peints dans le cas des déchets de démolition.

L'équilibre offre-demande de déchets PVC

L'offre de déchets "propres" en PVC est très inférieure à la demande de produits recyclés à forte valeur ajoutée. C'est en particulier le cas de la collecte de fenêtres / volets usagés, qui demeure nettement insuffisante en tonnage. Ceci s'explique en partie par le fait que le marché des fenêtres et volets en PVC est relativement récent dans la plupart des

pays (début des années 80 en Espagne, encore plus récent en Europe Centrale, en démarrage dans les pays émergents). Du fait de la durée de vie élevée de ces produits, la montée en puissance des tonnages de produits en fin de vie est très lente.

Pour la plupart des autres segments, les quantités de déchets disponibles restent limitées en volume, qu'il s'agisse de revêtements de sols, de tuyaux, d'emballages ou de câbles.

Toute action visant à augmenter l'offre en matière recyclée de bonne qualité aura pour effet d'augmenter d'autant la quantité de matière recyclée et donc d'économiser la même quantité de matière vierge.

Le procédé Vinyloop

Le procédé Vinyloop n'a pas connu, pour l'instant, de développement industriel à grande échelle. Compte tenu des capacités en jeu, il semble raisonnable de faire l'hypothèse que ce procédé ne sera pas le moteur du développement du recyclage du PVC à moyen-terme.

Produits recyclés		Gardes-boue pour camions, membranes d'étanchéité pour tunnels (sous-couche), géomembranes, tuyaux (intérieurs), matière première de compounds PVC (injection, extrusion), textile pour mobilier extérieur et aménagement intérieur de bâtiments
Déchets utilisés en majorité		Câbles Bâches (bâtiment, publicitaires, protection pour travaux, camions, tentes et marquises). Membranes d'étanchéité pour toitures Revêtements de sol Blisters pour produits alimentaires ou pharmaceutiques. Châssis de fenêtres et volets roulants
Part (%) du recyclé dans les produits	Actuelle	Garde-boue pour camions : 100 % Membranes d'étanchéité pour tunnels (sous-couche) : 20 à 70 % Géomembranes : 100 % ROD : 100 % Tuyaux (intérieurs) : 30 à 100 % Matière première de compounds PVC (injection, extrusion) : 10 à 90 % Textile pour mobilier extérieur et aménagement intérieur de bâtiments : 50 à 100 %
	Maximale théorique	Compte tenu de la qualité du PVC recyclé, on peut envisager d'inclure une proportion élevée de recyclé (jusqu'à 100 %) dans la plupart des applications. Une centrifugeuse sera installée en septembre 2008 en pré-traitement des déchets. Elle permettra d'améliorer la propreté des produits entrants.
Production		2007 : 5,2 kt (pour 8,2 kt de déchets traités) 2008 : 6,8 kt (pour 9,5 kt de déchets traités) Objectif 2010 : 10kt (capacité de l'usine de Ferrare) Une unité de production d'une capacité de production de 18 kt est opérationnelle depuis 2006 au Japon. Exploitée par Kobelco Vinyloop® East Co. elle fonctionne à partir de déchets de câbles, de feuilles de serres agricoles et de papier peint. Toutefois, elle ne fonctionne qu'à environ 50% de sa capacité par intermittence, du fait du manque de déchets disponibles.
Principales contraintes liées au recyclage		Pas
Qualité (grade) de la résine recyclée utilisée		Le recyclage donne des granules de PVC d'une très bonne qualité, qui peuvent remplacer le PVC vierge, à l'exception des films minces. Un fabricant anglais propose des fenêtres en 100 % recyclé.
Restrictions légales pour l'incorporation de résine recyclée dans certains usages		Non. Pas de restrictions supplémentaires par rapport à celles qui s'appliquent à l'ensemble des plastiques.
Localisation des « sources » du recyclé		Italie

Le PVC recyclé par procédé mécanique

Les produits recyclés et leurs débouchés

Produits recyclés		Tuyaux (agriculture et construction)	Revêtements de sols	Profilés (dont fenêtres)	Autres (panneaux de signalisation, mobilier urbain, membranes imperméables, murs anti-bruit,...)
Déchets utilisés en majorité		Tuyaux	Revêtements de sols	Fenêtres	Câbles
		Revêtements de sols		Revêtements de sols	Fenêtres
Même une collecte extrêmement spécifique des déchets ne permet pas d'atteindre des niveaux élevés d'homogénéité. Ceci génère des contraintes fortes. Ainsi, pour le recyclage en boucle fermée de produits tels que les tuyaux, le recyclé n'est utilisable qu'en couche interne dans des tuyaux multi-couches.					
D'autre part, il est impératif d'exclure toute présence de PVC souple dans les déchets destinés à fabriquer des produits recyclés rigides.					
Type de boucle		Fermée	Fermée	Ouverte	Ouverte
Part (%) du recyclé dans les produits	Actuelle	30 %	Jusqu'à 60 % dans la sous-couche.	60 à 70 %	< 30 %
	Maximale théorique		Jusqu'à 100 % dans les revêtements bas de gamme.		30 %

Produits recyclés		Tuyaux (agriculture et construction)	Revêtements de sols	Profilés (dont fenêtres)	Autres (panneaux de signalisation, mobilier urbain, membranes imperméables, murs anti-bruit,...)
Demande totale de produits (X 1 000 tonnes)	Vierge	Agriculture : 100 kt Construction : 1 700 kt	420 kt	1 600 kt	200 kt
	Recyclé	20 kt	1 à 2 kt	13 à 15 kt	Membranes : 4 à 5 kt Murs anti-bruit : 1 à 2 kt Panneaux de signalisation, mobilier urbain : 28 à 30 kt Autres (terrains de sport,...) : 4 à 5 kt
Evolution probable de la demande de produits (% annuel)	Vierge	La demande de PVC est soutenue sur l'ensemble des segments du marché, en particulier en Europe de l'est et en Asie.			
	Recyclé	Demande en forte croissance			

Facteurs de développement des produits recyclés en PVC

Produits recyclés	Tuyaux	Revêtements de sols	Profilés (dont fenêtres)	Autres (panneaux de signalisation, mobilier urbain, membranes imperméables, murs anti-bruit,...)
<p>Principales contraintes liées au recyclage</p>	<p>Les " peaux " intérieures et extérieures sont constituées de résines vierges. Seule la couche interne constituant le " cœur " du tuyau est d'origine recyclé (co-extrusion), sous réserve que l'origine des déchets utilisés soit parfaitement spécifiée.</p>	<p>Dans le cas du recyclage en boucle fermée, le principal débouché est destiné aux sous-couches fabriquées par calandrage. L'épaisseur du produit final doit toutefois être >3mm pour pouvoir contenir du recyclé.</p> <p>La présence de colles et d'adhésifs et la teneur élevée en charges et en additifs limitent la qualité des produits recyclés.</p>	<p>Les différences de composition et de teneur en additifs dans les fenêtres usagées collectées ne posent généralement pas trop de problèmes.</p> <p>En théorie, il est possible de fabriquer des fenêtres composées de 100 % de recyclé. Toutefois, la qualité de surface médiocre et la couleur grise des produits obtenus limitent considérablement les débouchés et incitent les recycleurs à utiliser le recyclé pour le « cœur » (co-extrusion) avec une teneur maximale de 60 - 70 %.</p>	<p>Lorsque le PVC est traité avec d'autres plastiques, la température de traitement est limitée à la plage de traitement du PVC, qui est relativement faible par rapport à celle d'autres plastiques.</p> <p>Pour le recyclage en mélange, il faut donc prendre garde à ne pas dépasser la température de transformation du PVC afin d'éviter les émissions de HCl (corrosion de l'extrudeuse) et la destruction de la structure du polymère.</p> <p>Afin d'éviter que le PVC ne dégrade trop la qualité finale du produit recyclé, il est préférable que la proportion de polyoléfines dans le mélange de plastiques soit au minimum de 70 %.</p>
	<p>En raison de leurs densités similaires, les déchets de PET et de PVC sont difficiles à séparer.</p> <p>La présence d'additifs classés comme le plomb, le cadmium et les PCB dans beaucoup de déchets de PVC à longue durée de vie soulève des problèmes spécifiques. En particulier, le recyclage des déchets de PVC contenant des métaux lourds entraîne une dilution de ces substances dans une quantité plus importante de PVC, étant donné qu'il est nécessaire d'ajouter du matériau vierge. Toutefois, la plupart des États membres qui ont interdit l'utilisation du cadmium comme stabilisant permettent le recyclage de déchets de PVC contenant du cadmium.</p> <p>Les câbles HT et MT(isolation PVC) contenant plus de 50 ppm de PCB doivent être décontaminés ou éliminés conformément aux dispositions de la directive européenne.</p>			

Produits recyclés	Tuyaux	Revêtements de sols	Profilés (dont fenêtres)	Autres (panneaux de signalisation, mobilier urbain, membranes imperméables, murs anti-bruit,...)
Facteurs influençant la demande ?	Prix du PVC vierge			
Qualité (grade) de la résine recyclée utilisée	<p>La qualité de la résine PVC recyclée dépend de la variabilité et du degré de contamination des déchets utilisés. Pour la quasi-totalité des déchets PVC (y compris pour les fenêtres) il est souvent difficile de collecter des déchets homogènes et propres.</p> <p>D'autre part, contrairement au polyéthylène et au polypropylène, les produits en PVC sont presque toujours des compounds incluant une grande variété d'additifs, de stabilisants, de plastifiants, de charges inertes, de pigments etc.... En outre, la composition de ces compounds, pour un même produit, évolue dans le temps du fait de l'évolution des technologies (c'est le cas des fenêtres notamment).</p> <p>De ce fait, le recyclage mécanique du PVC produit une résine de qualité inférieure au PVC vierge</p> <p>La dégradation de qualité due au recyclage est modérée. Pour la plupart des applications haut de gamme en PVC rigide, aucun surdimensionnement n'est prévu lié à une compensation d'une dégradation des caractéristiques mécaniques. En outre, cette dégradation n'est pas augmentée pour un plastique subissant plusieurs recyclages.</p> <p>Au contraire, dans le cas des films demandant une certaine résistance mécanique, il est nécessaire d'augmenter l'épaisseur.</p>			
	Elevée			Faible
Restrictions légales pour l'incorporation de résine recyclée dans certains usages	<p>Restrictions réglementaires à l'usage de PVC recyclé dans les tuyaux (usage toléré uniquement pour les applications de drainage)</p> <p>Restrictions pour la fabrication de films d'emballage alimentaire.</p>			
Matériaux en concurrence avec la résine recyclée	PVC vierge, Béton, fonte, PP, PEHD, grès	PVC vierge, Jute PP	Pour les châssis de fenêtre : PVC vierge, Aluminium (et bois dans une moindre mesure)	<p>-Mobilier urbain : bois, béton, plastiques mélangés</p> <p>-Panneaux de signalisation : acier</p> <p>-Murs anti-bruit : béton, plastiques mélangés</p>
Localisation des « sources » du recyclé	Europe de l'ouest, USA			

Produits recyclés	Tuyaux	Revêtements de sols	Profilés (dont fenêtres)	Autres (panneaux de signalisation, mobilier urbain, membranes imperméables, murs anti-bruit,...)
Localisation des débouchés du recyclé	La demande est particulièrement soutenue dans les pays émergents. Une proportion significative de fenêtre usagées en PVC étaient exportées vers les pays "nouveaux entrants" de l'UE pour y être réutilisées. Ces flux ont fortement diminué depuis l'entrée en activité d'unités de production de fenêtres neuves dans ces pays.			
Facteurs directeurs des prix du marché	<u>Prix actuels du PVC :</u> - Vierge : 1 100 €/t - Recyclé : 550 à 650 €/t			
Motifs d'achat de recyclé au lieu de matière vierge	Prix uniquement.			
Mécanismes / facteurs de choix du passage d'un matériau à un autre. Freins à ce type de substitution	Pour être compétitifs sur le marché, les produits fabriqués à partir de PVC recyclé (par exemple les profilés de fenêtres extrudés) doivent bénéficier d'un label de qualité. Pour les produits haut de gamme (fenêtres) la demande s'oriente de plus en plus vers l'aluminium.			

Polystyrène - PS

Le PS que nous étudions plus spécifiquement provient des emballages thermoformés en PS

Le gisement de déchets d'emballages thermoformés en PS

La plupart des déchets de corps creux thermoformés en PS sont aujourd'hui collectés en mélange avec les déchets ménagers. Depuis quelques années, de nombreuses expériences de collecte se sont développées (gobelets, pots de yaourts et autres produits laitiers frais, barquettes de margarine) en particulier en Grande-Bretagne, aux Pays-Bas, en Allemagne et en Suisse. Ces collectes ne représentent toutefois que des quantités limitées.

Le gisement global annuel de déchets s'élève à environ 1 100 ktonnes (pots, gobelets, plateaux souples...). Une faible fraction de ce gisement est recyclée : de l'ordre de 70 à 100 ktonnes / an au maximum.

Les débouchés des produits recyclés

Les principaux débouchés du PS recyclé sont constitués :

- de produits moulés par injection pour des objets domestiques tels que des étagères, plateaux, cassettes video ou audio, cintres,... Ce marché présente des débouchés assez porteurs à moyen-terme. Le taux de substitution par rapport à la matière vierge est de l'ordre de 1.
- de produits extrudés en plaques tels que la couche intermédiaire des emballages pour les œufs.

Quelques applications existent également dans l'automobile. Il n'y a pas d'applications avec contact alimentaire.

Le PS recyclé est peu utilisé en mélange avec d'autres résines.

Pour les usages avec contact alimentaire (recyclage en boucle fermée) le PS recyclé est utilisable en tant que couche intermédiaire dans des produits multi-couches co-injectés (gobelets à café contenant 25 à 30 % de recyclé). Toutefois, les expériences réalisées pour fabriquer des pots de yoghourts n'ont pas été concluantes car il est nécessaire d'incorporer de l'oxyde de titane pour remédier au problème de couleur, ce qui rend le produit trop lourd.

Pour les application moulées et thermoformées, il n'y a pas d'obstacle technique à l'incorporation de recyclé en mélange avec du vierge jusqu'à une proportion de 30 à 50 %.

La principale contrainte pour le recyclage réside dans la propreté du déchet utilisé, qui doit provenir soit d'une collecte sélective en amont soit d'un tri manuel de bonne qualité dans les déchets ménagers. Le tri est rendu difficile par la difficulté de différencier le PS et le PP pour certains objets. Un tri complémentaire est souvent nécessaire par un procédé humide ainsi qu'un lavage, afin d'éliminer les restes de nourriture et les étiquettes.

L'obtention de produits recyclés de bonne qualité lors du moulage par injection est liée au respect des contraintes de viscosité. La solution la plus communément adoptée consiste à utiliser des mélanges vierge / recyclé.

Prix du PS

Vierge (cristal) : 1,30 / 1,40 €/kg

Recyclé : 0,90 à 1 €/kg

L'équilibre offre de déchets – demande de produits recyclés

La consommation de produits thermoformés, principalement orientée vers les applications alimentaires, représente environ 1 million de tonnes au niveau européen : pots de yaourts, barquettes de margarine... Du fait des contraintes techniques et réglementaires, la part du PS recyclé dans la consommation de PS reste faible.

Globalement, la demande de résine PS recyclée issue des emballages thermoformés est supérieure à l'offre de déchets collectés.

Acrylonitrile butadiène styrène (ABS)

L'ABS étudié plus spécifiquement provient des DEEE

Consommation mondiale d'ABS : 5.4 Mt
 Consommation européenne d'ABS : 0,8 Mt

Le gisement de déchets

L'ABS représente environ 30 % en poids du total des plastiques contenus dans les DEEE. Il est très souvent sous la forme d'alliages. Ainsi, 60 % de l'ABS utilisé dans les équipements informatiques est constitué de mélanges, en particulier avec le polycarbonate (PC) et dans une moindre mesure avec le HIPS et le PPO.

Dans le cas des DEEE, on trouve de l'ABS principalement dans les éléments suivants :

Matériel informatique : boîtiers d'unités centrales (ABS ou alliages ABS/PC et ABS/HIPS), claviers (coque en ABS ou ABS/PC) et boîtiers d'écrans de micro-ordinateurs (ABS/PC). L'usage des alliages ABS/PC s'est fortement développé au cours des 5 dernières années.

Gros électroménager : toutefois, la part relative de l'ABS a tendance à diminuer dans le GEM au profit du HIPS. Cette tendance se poursuivra dans le futur.

Télécoms : boîtiers de téléphones mobiles (alliages ABS/PC)

Photocopieurs : panneaux d'habillage extérieur et tiroirs.

Imprimantes : habillage extérieur (ABS pur ou alliages ABS/PC). La part relative de l'ABS dans cette catégorie a globalement diminuée depuis cinq ans (substitution par le PS).

Cartouches de toner : alliages ABS/PC. La part de l'ABS a diminué depuis cinq ans au profit du PP.

Petit électroménager : petites pièces en plastique situées à proximité des moteurs électriques, en alliage PA/ABS/PP.

Produits bruns : enveloppes extérieures des téléviseurs à écrans plats (environ 10 % du poids de l'appareil). De plus, 60 à 70 % des appareils mis sur le marché ont des enveloppes en alliages ABS/PC et 30 à 40 % en HIPS ou en PPO/PS. Le développement des alliages ABS/PC est dû à des contraintes techniques, liées en particulier à la température d'utilisation élevée. Pour mémoire, l'enveloppe des téléviseurs à tubes cathodiques est majoritairement en HIPS.

Applications professionnelles : dans les interrupteurs, l'ABS représente 60 % des plastiques contenus dans ces équipements.

Les débouchés de l'ABS recyclé

Les applications des produits à base d'ABS recyclé sont extrêmement diverses : pièces pour les EEE, pièces automobiles non apparentes, cageots (co-injection), pièces pour téléphones, valises, meubles de bureaux,... Les mélanges vierge/recyclé permettent d'obtenir des produits de meilleure qualité. Toutefois ces débouchés représentent des tonnages faibles, environ 20 à 30 kt/an au niveau européen, pour une consommation de résine vierge de l'ordre de 800 kt/an.

De nombreux obstacles s'opposent à l'utilisation d'ABS recyclé sur une grande échelle :

- L'ABS est souvent utilisé en alliage, en particulier avec le polycarbonate (PC) et dans une moindre mesure avec le HIPS et le PPOS. En outre, les retardateurs de flamme bromés sont présents en quantités significatives dans les pièces en ABS et en alliages ABS/HIPS ou ABS/PC. Ceci constitue un obstacle important pour le recyclage matière dans la mesure où les pièces en plastique recyclé obtenues à partir d'alliages ABS/PC contenant des retardateurs de flamme phosphorés ont des performances médiocres. Par exemple, il n'est pas possible d'utiliser de l'ABS recyclé pour fabriquer des alliages ABS/PC car la présence de RF bromés entraîne une dépolymérisation du PC. Il en résulte une forte dégradation de la qualité des produits recyclés ;
- La présence d'autres contaminants que les retardateurs de flamme dans les déchets d'ABS traités est également un obstacle. Les tests de performance réalisés sur des produits moulés en plastiques recyclés issus de DEEE montrent que la résistance à l'impact des produits recyclés peut être diminuée d'un facteur dix par rapport à celle des produits fabriqués avec des résines vierges, à cause de la présence d'encres d'impression et de colles. L'utilisation de mélanges vierge / recyclé constitue un moyen pour améliorer les performances des produits recyclés. La réalisation de produits multi-couches est également une possibilité pour accroître les performances techniques des produits recyclés (par exemple la combinaison d'un alliage ABS/PS recyclé pour le « cœur » du produit et d'un ABS vierge pour la surface).
- Enfin, malgré des développements en cours techniquement prometteurs, le recyclage en boucle fermée des plastiques issus des DEEE (dans des EEE neufs) devrait rester limité en volume car la fabrication des EEE est très majoritairement réalisée hors d'Europe.

Dans les appareils fabriqués aujourd'hui les retardateurs bromés ont été totalement remplacés par des non halogénés. A moyen-terme, la part des DEEE contenant des retardateurs bromés devrait donc diminuer progressivement. La production d'une matière recyclée ayant des propriétés mécanique proches de celles de l'ABS vierge en réalisant un mélange d'ABS recyclé et de PC recyclé semble être une perspective intéressante, sachant que le PC ne subit pas de dégradation marquée au cours du recyclage, et que le mélange ABS-PC est un matériau que l'on trouve de plus en plus fréquemment dans les DEEE (cf. ci-dessus).

Principaux matériaux en concurrence avec l'ABS recyclé :

ABS vierge
HIPS
PP.

Prix du HIPS

Vierge : 1,48 Euro/kg

Recyclé : 1 à 1,1 Euro/kg.

L'équilibre offre de déchets-demande de produits recyclés

Les multiples contraintes liées à la qualité des pièces en ABS contenues dans les EEE en fin de vie constituent un obstacle majeur au développement à grande échelle des produits recyclés. Ces contraintes limitent le volume des débouchés à des niches de marché à valeur ajoutée moyenne. La part théorique maximale d'ABS recyclé pour les différentes applications est donc limitée car l'ABS se trouve en concurrence avec d'autres matériaux.

A moyen-terme, la diminution escomptée de la teneur en retardateurs bromés dans les DEEE permet d'envisager des développements nouveaux basés sur des résines recyclées de meilleure qualité. Il est toutefois peu probable que le marché arrive à saturation.

[AJI-EUROPE : 23/09/2008]

Liste des tableaux

Tableau 1 : Valeur des coûts environnementaux totaux retenus pour les gaz à effet de serre.....	23
Tableau 2 : Valeur des coûts externes totaux retenus pour les gaz à effet de serre	24
Tableau 3 : Nature des substitution aux énergies fossiles considérées pour le calcul du facteur de monétarisation « consommation de ressources ».....	25
Tableau 4 : Taux d’internalisation calculés selon le prix du baril du pétrole et la valeur du facteur de monétarisation.....	26
Tableau 5 : Définition des papiers étudiés suivant les différentes nomenclatures	34
Tableau 6 : Flux commerciaux de PCR dans les pays du CEPI en 2006	35
Tableau 7 : Débouchés européens des PCR étudiés	44
Tableau 8 : Consommations pour la production d'une tonne de pâte de papier recyclée, destinée à la fabrication de cartons ondulés.....	48
Tableau 9 : émissions à la production d'une tonne de pâte de papier recyclée de type wellenstoff, destinée à la fabrication de cartons ondulés	48
Tableau 10 : émissions de polluants dans l'eau lors de la production de pâte désencrée (après traitement des eaux usées)	49
Tableau 11 : Consommations pour la production d'une tonne de pâte de papier recyclée destinée à la fabrication de journaux.....	49
Tableau 12 : Consommations pour la production d'une tonne de pâte de papier recyclée destinée à la fabrication de papier sanitaire.....	50
Tableau 13 : Consommation d’énergie de séchage soustraite des procédés de production de pâte d’EcoInvent 2.0.....	51
Tableau 14 : Consommations de ressources lors de la production de pâte thermo-mécanique.....	52
Tableau 15 : émissions dans l'eau lors de la production de pâte mécanique.....	52
Tableau 16 : Consommations de ressources lors de la production de pâte kraft blanchie	53
Tableau 17 : émissions dans l'eau lors de la production de pâte kraft blanchie	53
Tableau 18 : Surplus d’énergie lié à la production d’une tonne de pâte kraft blanchie	54
Tableau 19 : Consommations de ressources lors de la production de pâte kraft non-blanchie	54
Tableau 20 : émissions dans l'eau lors de la production de pâte kraft non-blanchie	55
Tableau 21 : Surplus d’énergie lié à la production d’une tonne de pâte kraft blanchie	55
Tableau 22 : Données de transport des pâtes vierge et des pâtes recyclées	56
Tableau 23 : Facteurs de monétarisation utilisés pour la modélisation des nuisances liées aux transports.....	57
Tableau 24 : Mix électrique continu conséquentiel européen.....	61
Tableau 25 : Mix électrique continu conséquentiel français.....	61
Tableau 26 : Mix de chaleur moyen européen	62
Tableau 27 : Mix de chaleur moyen français	62
Tableau 28 : Recyclage des cartons d'emballages – Description des phases.....	63
Tableau 29 : Coût environnemental total du recyclage d'une tonne de cartons d’emballages en carton ondulé	64
Tableau 30 : Décomposition des impacts du recyclage d'une tonne de carton d'emballage, par phase et par catégorie d'impact, cas du scénario 1 (ressource bois illimitée)	69
Tableau 31 : Décomposition des impacts du recyclage d'une tonne de carton d'emballage, par phase et par catégorie d'impact, cas du scénario 2a (Substitution de fossile)	69
Tableau 32 : Décomposition des impacts du recyclage d'une tonne de carton d'emballage, par phase et par catégorie d'impact, cas du scénario 2b (Substitution de renouvelable).....	69
Tableau 33 : Principaux contributeurs au bilan global des scénarios.....	71
Tableau 34 : Coût environnemental externe du recyclage de cartons d’emballages en carton ondulés.....	71

Tableau 35 : Influence des paramètres	74
Tableau 36 : Résultats selon la monétarisation de l'effet de serre.....	77
Tableau 37 : Résultats selon la monétarisation des consommations d'énergie	78
Tableau 38 : Coût environnemental total du recyclage de journaux et magazines en pâte à journal	78
Tableau 39 : Décomposition des impacts du recyclage d'une tonne de journaux, par phase et par catégorie d'impact (scénario 1, mix électrique 100 % nucléaire).....	84
Tableau 40 : Décomposition des impacts du recyclage d'une tonne de journaux, par phase et par catégorie d'impact (scénario 1, mix électrique 100 % renouvelable)	84
Tableau 41 : Décomposition des impacts du recyclage d'une tonne de journaux, par phase et par catégorie d'impact (scénario 2a, mix 100 % nucléaire).....	85
Tableau 42 : Décomposition des impacts du recyclage d'une tonne de journaux, par phase et par catégorie d'impact (scénario 2a, mix 100 % renouvelable)	85
Tableau 43 : Décomposition des impacts du recyclage d'une tonne de journaux, par phase et par catégorie d'impact (scénario 2b, mix 100 % nucléaire).....	86
Tableau 44 : Décomposition des impacts du recyclage d'une tonne de journaux, par phase et par catégorie d'impact (scénario 2b, mix 100 % renouvelable)	86
Tableau 45 : Principaux contributeurs au bilan global des scénarios.....	88
Tableau 46 : Coût externe du recyclage de journaux	88
Tableau 47 : Influence des paramètres	91
Tableau 48 : Résultats selon la monétarisation de l'effet de serre.....	94
Tableau 49 : Résultats selon la monétarisation des consommations d'énergie	95
Tableau 50 : Coût environnemental total du recyclage d'une tonne de cartons ondulés en carton ondulés	96
Tableau 51 : Décomposition des impacts du recyclage d'une tonne de cartons ondulés, par phase et par catégorie d'impact, cas du scénario 1 (ressource bois illimitée)	100
Tableau 52 : Décomposition des impacts du recyclage d'une tonne de cartons ondulés, par phase et par catégorie d'impact, cas du scénario 2a (Substitution de fossile)	100
Tableau 53 : Décomposition des impacts du recyclage d'une tonne de cartons ondulés, par phase et par catégorie d'impact, cas du scénario 2b (Substitution de renouvelable).....	100
Tableau 54 : Principaux contributeurs au bilan global des scénarios.....	102
Tableau 55 : Coût environnemental externe du recyclage de cartons ondulés en carton ondulés	102
Tableau 56 : Influence des paramètres	105
Tableau 57 : Résultats selon la monétarisation de l'effet de serre.....	108
Tableau 58 : Résultats selon la monétarisation consommations d'énergie	109
Tableau 59 : Coût environnemental total du recyclage de papier de bureau en pâte à papier sanitaire	109
Tableau 60 : Décomposition des impacts du recyclage d'une tonne de papiers de bureaux, par phase et par catégorie d'impact (scénario 1, mix électrique 100 % nucléaire)	114
Tableau 61 : Décomposition des impacts du recyclage d'une tonne de papier de bureaux, par phase et par catégorie d'impact (scénario 2a, mix électrique 100 % renouvelable)	114
Tableau 62 : Décomposition des impacts du recyclage d'une tonne de papier de bureaux, par phase et par catégorie d'impact (scénario 2b, mix 100 % nucléaire).....	114
Tableau 63 : Principaux contributeurs au bilan global des scénarios.....	116
Tableau 64 : Coût environnemental externe du recyclage de papier de bureaux.....	117
Tableau 65 : Influence des paramètres	119
Tableau 66 : Résultats selon la monétarisation de l'effet de serre.....	122
Tableau 67 : Résultats selon la monétarisation des consommations d'énergie	123
Tableau 68 : Synthèse – Hypothèses de modélisation	124

Tableau 69 : Bilan environnemental du recyclage des papiers cartons (Mix 100 % nucléaire).....	125
Tableau 70 : Mix électrique conséquentiel français (consommation continue).....	130
Tableau 71 : Mix électrique conséquentiel européen (consommation continue)	131
Tableau 72 : Procédés utilisés et adaptation aux mix électriques conséquentiels.....	132
Tableau 73 : Modélisation des transports pour les flux PET, PEHD, PEBD	133
Tableau 74 : Modélisation des transports pour le flux PVC.....	134
Tableau 75 : Modélisation des transports pour les flux PS et ABS	134
Tableau 76 : Mix électrique moyen français	135
Tableau 77 : Mix électrique moyen européen Valeur du facteur de monétarisation.....	135
Tableau 78 : Offre et demande de PET recyclé pour les différentes applications.....	138
Tableau 79 : Applications du PET recyclé et matériaux remplacés	139
Tableau 80 : Consommations du recyclage du PET en granulés recristallisés (par tonne entrante).....	142
Tableau 81 : Recyclage du PET – Description des phases.....	143
Tableau 82 : Résultats chiffrés (en valeur absolue)- Recyclage du PET – Coût environnemental total	145
Tableau 83 : Résultats chiffrés (en valeur absolue)- Recyclage du PET – Coût externe total	148
Tableau 84 : Influence des paramètres	149
Tableau 85 : Recyclage du PET - Résultats du scénario de base et de la variante "mix moyen"	152
Tableau 86 : Recyclage PET- Résultats selon le prix du baril de pétrole.....	153
Tableau 87 : Recyclage PET - Résultats selon le degré d’internalisation des coûts des émissions de GES.....	153
Tableau 88 : Présentation de l’offre et la demande de PEHD recyclé pour les différentes applications	155
Tableau 89 : Présentation des matériaux en concurrence avec le PEHD recyclé.....	156
Tableau 90 : Consommations du recyclage du PEHD en paillettes par tonne entrante	157
Tableau 91 : Description des phases.....	157
Tableau 92 : Recyclage PEHD – Coût environnemental total -Résultats chiffrés (en valeur absolue).....	159
Tableau 93 : Recyclage PEHD – Coût environnemental total -Résultats chiffrés (en valeur absolue).....	161
Tableau 94 : Recyclage du PEHD - Influence des paramètres.....	162
Tableau 95 : Recyclage du PEHD - Résultats du scénario de base et de sa variante.....	164
Tableau 96 : Résultats du recyclage du PEHD selon le prix du baril de pétrole	165
Tableau 97 : Recyclage du PEHD - Résultats du scénario Mix conséquentiel selon le degré d’internalisation des coûts des émissions de gaz à effet de serre	165
Tableau 98 : Présentation de l’offre et la demande de PEBD recyclé pour les différentes applications	168
Tableau 99 : Présentation des matériaux en concurrence avec le PEBD recyclé.....	169
Tableau 100 : Consommations du recyclage du PEBD en paillettes en tonnes entrantes	170
Figure 101 : Schéma de fonctionnement d’une extrusion de film PEBD (Source : Plastics Europe)	171
Tableau 102 : Recyclage du PEBD - Description des phases.....	171
Tableau 103 : Recyclage du PEBD - Résultats chiffrés (en valeur absolue) du coût environnemental total.....	173
Tableau 104 : Recyclage du PEBD - Résultats chiffrés (en valeur absolue).....	175
Tableau 105 : Recyclage du PEBD - Influence des paramètres.....	176
Tableau 106 : Recyclage du PEBD - Résultats du scénario de base et de sa variante.....	178
Tableau 107 : Résultats du recyclage du PEBD selon le prix du baril de pétrole	178
Tableau 108 : Recyclage PEBD - Résultats du scénario Mix conséquentiel selon le degré d’internalisation des coûts des émissions de gaz à effet de serre	179
Tableau 109 : Présentation de l’offre et la demande de PVC recyclé pour les différentes applications	180
Tableau 110 : Présentation des matériaux en concurrence avec le PVC recyclé	181
Tableau 111 : Consommations du recyclage du PVC par tonnes entrantes.....	183
Tableau 112 : Recyclage du PVC - Description des phases	183

Tableau 113 : Recyclage PVC – Coût environnemental total - Résultats chiffrés (en valeur absolue).....	185
Tableau 114 : Recyclage PVC – Coût externe total -Résultats chiffrés (en valeur absolue)	187
Tableau 115 : Influence des paramètres	188
Tableau 116 : Recyclage PVC - Résultats du scénario de base et de sa variante	190
Tableau 117 : Résultats du recyclage du PVC selon le prix du baril de pétrole	190
Tableau 118 : Recyclage PVC - Résultats du scénario Mix conséquentiel selon le degré d’internalisation des coûts des émissions de gaz à effet de serre	191
Tableau 119 : Présentation des matériaux en concurrence avec le PS recyclé	193
Tableau 120 : Consommations du recyclage du PS en tonnes entrantes	193
Tableau 121 : Recyclage du PS - Description des phases.....	194
Tableau 122 : Recyclage PS – Coût environnemental total - Résultats chiffrés	197
Tableau 123 : Recyclage PS – Coût externe total - Résultats chiffrés	200
Tableau 124 : Recyclage PS - Influence des paramètres.....	201
Tableau 125 : Recyclage PS - Résultats du scénario de base et de sa variante.....	203
Tableau 126 : Résultats du recyclage du PS selon le prix du baril de pétrole – Scénario 1	204
Tableau 127 : Résultats du recyclage du PS selon le prix du baril de pétrole – Scénario 2a	204
Tableau 128 : Résultats du recyclage du PS selon le prix du baril de pétrole – Scénario 2b	204
Tableau 129 : Recyclage PS – Scénario1 - Résultats du scénario Mix conséquentiel selon le degré d’internalisation des coûts des émissions de gaz à effet de serre	205
Tableau 130 : Recyclage PS – Scénario2a - Résultats du scénario Mix conséquentiel selon le degré d’internalisation des coûts des émissions de gaz à effet de serre	205
Tableau 131 : Recyclage PS – Scénario2b - Résultats du scénario Mix conséquentiel selon le degré d’internalisation des coûts des émissions de gaz à effet de serre	205
Tableau 132 : Consommations du recyclage du PS en tonnes entrantes	208
Tableau 133 : Recyclage de l’ABS- Description des phases	209
Tableau 134 : Résultats chiffrés (en valeur absolue)- Recyclage d’ABS- Coût environnemental total.....	211
Tableau 135 : Résultats chiffrés (en valeur absolue)- Recyclage de l’ABS – Coût externe total	213
Tableau 136 : Recyclage de l’ABS - Influence des paramètres.....	214
Tableau 137 : Recyclage du ABS - Résultats du scénario de base et de la variante "mix moyen"	217
Tableau 138 : Recyclage ABS- Résultats selon le prix du baril de pétrole.....	218
Tableau 139 : Recyclage ABS - Résultats selon le degré d’internalisation des coûts des émissions de GES.....	219
Tableau 140 : Synthèse – Hypothèses de modélisation	222
Tableau 141 : Bilan environnemental du recyclage de tous les plastiques	223

Liste des figures

Figure 1 : Périmètre de l'étude	28
Figure 2 : Champ de l'étude pour les papiers / cartons.....	31
Figure 3 : Prévisions de l'évolution des consommations mondiales de fibres pour la production de papier	35
Figure 4 : PCR collectés et consommés dans les différentes régions du monde	37
Figure 5 : évolution des quantités de PCR utilisées.....	38
Figure 6 : Statistiques forestières en Europe.....	39
Figure 7 : Réactions du marché dans le cas où la demande en bois est inférieure à la production possible	41
Figure 8 : Réactions du marché dans le cas où la demande en bois est supérieure à la production et que les énergies renouvelables sont compétitives par rapport aux énergies fossiles.....	42
Figure 9 : Réactions du marché dans le cas où la demande en bois est supérieure à la production et que les énergies renouvelables ne sont pas compétitives par rapport aux énergies fossiles	43
Figure 10 : Débouchés des PCR dans la production de papier des pays du CEPI	45
Figure 11 : Utilisation des matières de base dans la production de papier mondiale, en fonction du produit fini.....	47
Figure 12 : Traitement de fin de vie des ordures ménagères en France.....	57
Figure 13 : Répartition géographique de la production de pâte à papier en Europe	60
Figure 14 : Impacts monétarisés du recyclage d'une tonne de cartons d'emballage	64
Figure 15 : Coût environnemental total pour l'ensemble des cas étudiés	65
Figure 16 : Coût environnemental total du recyclage d'une tonne de cartons d'emballages, détaillé par phase	66
Figure 17 : Coût environnemental de l'utilisation alternative du bois.....	67
Figure 18 : Contributions à la catégorie "toxicité humaine"	67
Figure 19 : Coût environnemental total du recyclage d'une tonne de cartons d'emballages, détaillé par catégorie d'impact.....	68
Figure 20 : Coût environnemental total et externe pour l'ensemble des couples scénario/mix électrique	72
Figure 21 : Coût externe du recyclage d'une tonne de cartons d'emballages, détaillé par phase	73
Figure 22 : Coût externe du recyclage d'une tonne de cartons d'emballages, détaillé par catégorie d'impact.....	73
Figure 23 : Sensibilité des résultats au rendement des chaudières bois.....	74
Figure 24 : Sensibilité des résultats à la fin de vie évitée	75
Figure 25 : Sensibilité des résultats au rendement du recyclage.....	75
Figure 26 : Sensibilité des résultats à la fin de vie des boues de recyclage	76
Figure 27 : Sensibilité des résultats à la consommation d'électricité du procédé de recyclage	76
Figure 28 : Impacts monétarisés du recyclage d'une tonne de journaux et magazines.....	79
Figure 29 : Coût environnemental total pour l'ensemble des cas étudiés	80
Figure 30 : Coût environnemental total du recyclage d'une tonne de journaux et magazines, détaillé par phase (mix 100 % nucléaire).....	81
Figure 31 : Coût environnemental total du recyclage d'une tonne de journaux et magazines, détaillé par phase (mix 100% renouvelable).....	81
Figure 32 : Coût environnemental total du recyclage d'une tonne de journaux et magazines, détaillé par phase, en fonction des mix électriques	82
Figure 33 : Coût environnemental total du recyclage d'une tonne de journaux, détaillé par catégorie d'impact (mix 100% nucléaire)	83
Figure 34 : Coût environnemental total du recyclage d'une tonne de journaux, détaillé par catégorie d'impact (mix 100% renouvelable).....	83
Figure 35 : Coût environnemental total et externe pour l'ensemble des couples scénario/mix électrique	89

Figure 36 : Coût environnemental externe du recyclage d'une tonne de journaux , détaillé par phase (mix 100% nucléaire)	90
Figure 37 : Coût environnemental externe du recyclage d'une tonne de journaux, détaillé par catégorie d'impact	90
Figure 38 : Sensibilité des résultats au rendement des chaudières bois.....	91
Figure 39 : Sensibilité des résultats à la consommation d'électricité du procédé de recyclage	92
Figure 40 : Sensibilité des résultats à la consommation de dithionite de sodium (procédé de recyclage).....	92
Figure 41 : Sensibilité des résultats au rendement du recyclage.....	93
Figure 42 : Sensibilité des résultats à la fin de vie des boues de recyclage	93
Figure 43 : Impacts monétarisés du recyclage d'une tonne de cartons ondulés	96
Figure 44 : Coût environnemental total pour l'ensemble des cas étudiés	97
Figure 45 : Coût environnemental total du recyclage d'une tonne de cartons ondulés, détaillé par phase.....	98
Figure 46 : Coût environnemental total du recyclage d'une tonne de cartons ondulés, détaillé par catégorie d'impact ...	99
Figure 47 : Coût environnemental total et externe pour l'ensemble des couples scénario/mix électrique	103
Figure 48 : Coût environnemental externe du recyclage d'une tonne de cartons ondulés, détaillé par phase	104
Figure 49 : Coût environnemental externe du recyclage d'une tonne de cartons ondulés, détaillé par catégorie d'impact	104
Figure 50 : Sensibilité des résultats au rendement des chaudières bois.....	105
Figure 51 : Sensibilité des résultats au rendement du recyclage.....	106
Figure 52 : Sensibilité des résultats à la fin de vie des boues de recyclage	106
Figure 53 : Sensibilité des résultats à la consommation d'électricité du procédé de recyclage	107
Figure 54 : Impacts monétarisés du recyclage d'une tonne de papier de bureaux.....	110
Figure 55 : Coût environnemental total pour l'ensemble des cas étudiés	111
Figure 56 : Coût environnemental total du recyclage d'une tonne de papier de bureaux, détaillé par phase (mix 100 % nucléaire)	112
Figure 57 : Coût environnemental total du recyclage d'une tonne papier de bureaux, détaillé par catégorie d'impact (mix 100% nucléaire)	113
Figure 58 : Coût environnemental total et externe pour l'ensemble des couples scénario/mix électrique	117
Figure 59 : Coût environnemental externe du recyclage d'une tonne de papier de bureaux , détaillé par phase (mix 100% nucléaire)	118
Figure 60 : Coût environnemental externe du recyclage d'une tonne de papier de bureaux, détaillé par catégorie d'impact.....	118
Figure 61 : Sensibilité des résultats au rendement des chaudières bois.....	119
Figure 62 : Sensibilité des résultats au rendement du procédé de recyclage	120
Figure 63 : Sensibilité des résultats au taux d'incinération des boues de recyclage	120
Figure 64 : Sensibilité des résultats aux consommations de chaleur du procédé de recyclage.....	121
Figure 65 : Sensibilité des résultats à la consommation électrique du procédé de recyclage	121
Figure 66 : Recyclage de tous les PCR – Sensibilité au rendement du procédé de recyclage	127
Figure 67 : Champ de l'étude pour les plastiques	128
Figure 68 : Flakes de PET.....	140
Figure 69: Granules de PET	141
Figure 70 : Etapes du recyclage en granules.....	141
Figure 71 : Schéma de principe d'une extrudeuse	142
Figure 72 : Recyclage du PET – Résultats par phase – Coût environnemental total.....	144
Figure 73 : Recyclage du PET – Résultats par phase – Coût externe total.....	147
Figure 74 : Recyclage PET - Sensibilité des coûts totaux au taux de substitution.....	150
Figure 75 : Recyclage PET - Sensibilité des coûts totaux en fonction de l'efficacité de recyclage	150

Figure 76 : Recyclage PET - Sensibilité des coûts totaux en fonction de la consommation électrique du recyclage	151
Figure 77 : Recyclage PET - Sensibilité des coûts totaux en fonction de la distance entre le centre de tri et le recycleur	151
Figure 78 : Recyclage PEHD – Coût environnemental total - Résultats par phase	158
Figure 79 : Recyclage PEHD – Coût externe total - Résultats par phase	160
Figure 80 : Recyclage du PEHD - Sensibilité des coûts totaux en fonction du taux de substitution.....	162
Figure 81 : Recyclage du PEHD - Sensibilité des coûts totaux en fonction de l'efficacité de recyclage	163
Figure 82 : Recyclage du PEHD - Sensibilité des coûts totaux en fonction de la consommation électrique du recyclage.	163
Figure 83 : Recyclage du PEHD - Sensibilité des coûts totaux en fonction du taux de substitution comparaison de l'approche conséquentielle et moyenne	164
Figure 84 : Recyclage du PEHD - Résultats de l'évolution du coût environnemental en fonction du rendement de l'incinération	166
Figure 85 : Recyclage du PEBD - Résultats par phase du coût environnemental total.....	172
Figure 86 : Recyclage du PEBD - Résultats par phase du coût externe total.....	174
Figure 87 : Recyclage du PEBD - Sensibilité des coûts totaux en fonction du taux de substitution	176
Figure 88 : Recyclage du PEBD - Sensibilité des coûts totaux en fonction de l'efficacité de recyclage.....	177
Figure 89 : Recyclage du PEBD - Sensibilité des coûts totaux en fonction de la consommation électrique lors du recyclage du PEBD	177
Figure 90 : Etapes du recyclage mécanique.....	182
Figure 91 : Recyclage PVC – Coût environnemental total - Résultats par phase.....	184
Figure 92 : Recyclage PVC – Coût externe total - Résultats par phase.....	186
Figure 93 : Recyclage PVC - Sensibilité des coûts totaux en fonction du taux de substitution.....	188
Figure 94 : Recyclage PVC - Sensibilité des coûts totaux en fonction de l'efficacité de recyclage	189
Figure 95 : Sensibilité des coûts totaux en fonction de la consommation électrique lors du recyclage du PVC.....	189
Figure 96 : Recyclage PS – Coût environnemental total - Résultats par phase	195
Figure 97 : Recyclage PS – Coût environnemental total - Résultats par catégorie d'impacts.....	196
Figure 98 : Recyclage PS – Coût externe total - Résultats par phase	199
Figure 99 : Recyclage PS – Coût environnemental total - Résultats par catégorie d'impacts.....	199
Figure 100 : Recyclage PS - Sensibilité des coûts environnementaux totaux à la consommation électrique lors du recyclage	202
Figure 101 : Recyclage PS - Sensibilité des coûts environnementaux totaux à l'efficacité de recyclage.....	202
Figure 102 : Recyclage du PS - Sensibilité des coûts totaux en fonction du taux de substitution pour la fin de vie évitée du bois	203
Figure 103 : Recyclage d'ABS- Résultats par phase – Coût environnemental total	210
Figure 104 : Recyclage de l'ABS – Résultats par phase – Coût externe total.....	212
Figure 105 : Recyclage ABS - Sensibilité des coûts totaux au taux de substitution.....	215
Figure 106 : Recyclage ABS - Sensibilité des coûts totaux à l'efficacité de recyclage	215
Figure 107 : Recyclage ABS - Sensibilité des coûts totaux à la consommation électrique du recyclage.....	216
Figure 108 : Recyclage ABS - Sensibilité des coûts totaux à scénario de fin de vie	217
Figure 109 : Recyclage de tous les plastiques - Sensibilité des coûts totaux au taux de substitution.....	225

Abréviations

ABS	Acrylonitrile butadiène styrène
BTP	Bâtiment et Travaux publics
ENR	Energies Renouvelables
FM	Facteur de monétarisation
GES	Gaz à effet de serre
PC	Papiers/Cartons
PCR	Papiers/Cartons Récupérés
PEBD	Polyéthylène Basse densité
PEHD	Polyéthylène Haute densité
PET	Polyéthylène téréphtalate
PS	Polystyrène
PVC	Polychlorure de vinyle

Glossaire

Efficacité du recyclage :	Ratio de la quantité de la matière visée qui sort du procédé de recyclage dans un flux qui sera recyclé et de la quantité de la matière visée qui entre dans le procédé de recyclage. Cette valeur tient donc compte des pertes de matière lors du procédé de recyclage. Par exemple, si un flux de 1 200 kg contenant 1 000 kg de PET est traité pour fournir un flux de 955 kg dont 950 kg de PET prêt à être mis en œuvre, l'efficacité de recyclage est $950/1000 = 95 \%$
Marché saturé (marché en excédent de matière recyclée) :	Un marché est dit "saturé" lorsque l'offre excède la demande pour une substitution à la même matière. De ce fait, la matière a des difficultés à trouver des débouchés à haute(s) valeur(s) environnementale (et économique).
Taux de substitution :	Rapport entre la quantité de matière remplacée et la quantité de matière recyclée nécessaire pour la remplacer. Il dépend de la différence de qualité entre le vierge et le recyclé
Coût environnemental total / coût externe / coût internalisé :	Valeur économique des impacts environnementaux négatifs d'une activité. Les impacts environnementaux non pris en compte dans la détermination des prix du marché sont appelés coûts externes. L'internalisation des coûts externes vise, via par exemple des taxes ou des normes à intégrer dans la détermination du prix ces coûts externes. Les acteurs sont ainsi incités à modifier leur comportement de telle façon à réduire ces externalités.

Commissariat général au développement durable

Service de l'économie, de l'évaluation et de l'intégration du développement durable

Tour Voltaire

92055 La Défense cedex

Tél : 01.40.81.21.22

Retrouver cette publication sur le site :

<http://www.developpement-durable.gouv.fr/developpement-durable/>, rubrique « Publications »

Résumé

Savoir dans quelle mesure les bénéfices environnementaux du recyclage justifient des surcoûts à supporter par la société est une question fondamentale pour le décideur public. La réponse à cette question passe par la réalisation d'une analyse coûts-bénéfices. Celle-ci nécessite d'attribuer une valeur monétaire à l'ensemble des coûts et bénéfices environnementaux.

L'étude conduit à donner une valeur monétaire aux impacts environnementaux du recyclage pour quatre types de papiers/cartons et six types de plastiques différents. Les résultats monétarisés s'appuient sur la méthode présentée dans le « guide méthodologique sur la monétarisation des impacts environnementaux du recyclage » (MEEDD/D4E, 2007).

L'étude met en évidence des bénéfices environnementaux qui varient entre 200 € et 400 € par tonne de matériau recyclé pour les papiers/cartons ; entre - 100 € et 1 000 € pour les plastiques. Plus de la moitié de ces bénéfices ne sont pas pris en compte dans la décision des acteurs économiques

Ces résultats, étroitement liés aux hypothèses de modélisation, correspondent à des flux particuliers de papiers/cartons et de plastiques. Ils ne sont pas extrapolables à l'ensemble des flux de papiers/cartons et de plastiques recyclés.

Ils donnent néanmoins des ordres de grandeur qui permettent d'orienter les politiques publiques en matière de recyclage mais aussi en vue de l'internalisation des coûts environnementaux de l'élimination afin de la tarifier à son vrai coût.



Dépôt légal : Mai 2011
ISSN : 2102 - 4723