



**ANALYSE DU CYCLE DE VIE
POUR 9 VOIES DE VALORISATION
DES PNEUS USAGES NON REUTILISABLES**



Document de référence
Publication juin 2010
R&D Aliapur

SOMMAIRE

SOMMAIRE.....	3
SECTION I - INTRODUCTION.....	5
SECTION II – LA METHODOLOGIE	7
1. Système étudié et unité fonctionnelle	7
2. Huit indicateurs environnementaux caractéristiques	7
3. Méthode des impacts évités.....	8
4. Affectation de l'énergie matière contenue dans les pneus.....	8
5. Evaluation des impacts toxiques et écotoxiques et autres études préalables menées par Aliapur	9
a) Gazons synthétiques	9
b) Bassins de rétention et bassins infiltrants	9
c) Sols équestres	10
6. Devenir des produits en fin de vie.....	10
SECTION III – PANORAMA DES RESULTATS ET CONCLUSIONS.....	11
1. Existence d'un bénéfice environnemental pour la majorité des voies de valorisation étudiées	11
2. Contribution des étapes de transport et de préparation des PUNR	13
3. Conclusions	14
4. Présentation graphique des bilans environnementaux pour les huit indicateurs et les neuf voies étudiés.....	15
SECTION IV – POUR ALLER PLUS LOIN SUR LA METHODOLOGIE	19
1. Taux de substitution	19
2. Analyses de sensibilité	20
a) Analyse de sensibilité concernant la prise en compte de l'énergie matière	20
b) Analyse de sensibilité concernant le procédé de granulation	21
3. Modélisation des étapes de transport des pneus usagés	22
SECTION V – POUR ALLER PLUS LOIN SUR CHACUNE DES VOIES DE VALORISATION	23
1. Focus sur les étapes de transport	23
2. Focus sur les voies non destructives	24
Focus sur les gazons synthétiques.....	24
Focus sur les objets moulés	25
Focus sur les sols équestres	26

Focus sur les bassins de rétention	27
Focus sur les bassins infiltrants	29
3. Focus sur les voies destructives	30
Focus sur la cimenterie	30
Focus sur la chaufferie urbaine	32
Focus sur l'aciérie	34
Focus sur la fonderie	35
SECTION VI – BIBLIOGRAPHIE	36

Utilisation du présent rapport

Aliapur a demandé au département développement durable de PricewaterhouseCoopers Advisory de réaliser une évaluation du bilan environnemental de différentes voies de valorisation des pneus usagés non recyclables (PUNR). Ce travail a été réalisé par PricewaterhouseCoopers Advisory dans le cadre de la commande de novembre 2008.

Le présent document est une synthèse du rapport complet intitulé « Analyse du Cycle de Vie pour les différentes voies de valorisation des pneus usagés ».

PwC Advisory n'accepte aucune responsabilité vis-à-vis de tout tiers à qui le rapport aurait été communiqué ou aux mains desquels il serait parvenu, l'utilisation de ce rapport par leurs soins relevant de leur propre responsabilité.

PwC Advisory et le commanditaire rappellent que les résultats présentés dans ce rapport sont seulement fondés sur des faits, circonstances et hypothèses qui ont été communiqués au cours des travaux. Si ces faits, circonstances et hypothèses diffèrent, les résultats sont susceptibles de changer.

De plus, il convient de considérer les résultats dans leur ensemble, au regard des hypothèses qui ont été réalisées, et non pas pris isolément.

Accès au rapport complet intégrant les résultats détaillés ainsi que les commentaires du panel de revue critique sur demande écrite de l'intéressé directement à Aliapur.

Etude réalisée en collaboration avec



SECTION I - Introduction

La Société Aliapur a été fondée en 2002 par les manufacturiers de pneumatiques afin d'apporter une réponse collective aux obligations réglementaires en vigueur en France concernant la gestion des pneus usagés.

Dès 2004, Aliapur a mis en œuvre un important programme de recherche industrielle afin de soutenir le développement et l'optimisation de voies de valorisation pérennes et diversifiées.

Fruit de ces différentes recherches, la valorisation des pneus usagés est d'ores et déjà réalisée par de multiples voies :

- Réemploi/rechapage : prolongation de la vie des pneus et retardement du statut pneu usagé non réutilisable
- Valorisation énergétique en cimenterie ou en chaufferie urbaine
- Valorisation matière du carbone et du fer des pneus usagés en aciérie ou en fonderie
- Valorisation en travaux publics pour la réalisation de bassins drainants ou de bassins de rétention
- Valorisation des granulats de pneus usagés dans la fabrication d'objets moulés, de gazons synthétiques ou de sols équestres

A l'heure où plusieurs voies de valorisation des pneus usagés non réutilisables ont acquis une maturité certaine, Aliapur a souhaité procéder à une **évaluation environnementale comparative de différentes alternatives de valorisation**.

Outre la comparaison de différentes alternatives, cette évaluation environnementale a pour objectifs d'identifier les points forts et les points à améliorer de chaque voie de valorisation ainsi que de l'ensemble de la gestion des pneumatiques usagés.

Cette évaluation, fondée sur une démarche d'Analyse du Cycle de Vie, a été réalisée conformément aux prescriptions méthodologiques développées dans les normes ISO 14040 et ISO 14044. Elle a été réalisée avec PricewaterhouseCoopers Ecobilan, cabinet spécialisé dans l'évaluation environnementale des produits et services, et a également fait l'objet d'une revue critique par un comité international d'experts et de parties prenantes.

L'étude a été menée sur une année complète d'activité. 2008 a été choisie comme référence pour sa représentativité des activités d'Aliapur actuelles et à venir (300 309 tonnes de pneus collectés et valorisés en 2008).

Quelques chiffres clés :

- 140 000 bords de collecte en 2008 représentant les tonnes de pneus collectées
- Collecte réalisée auprès de 40 000 détenteurs et distributeurs sur tout le territoire, vers 90 centres de tri
- 11 sites de transformation : regroupement et préparation à la valorisation (broyage...)
- 27 valorisateurs situés majoritairement en France mais également en Suède (chaufferie urbaine), au Maroc (cimenterie) et en Finlande (travaux publics).

Neuf voies de valorisation représentatives de la filière étudiées :

- Quatre voies de valorisation dites « destructives » : cimenterie, fonderie, aciérie, chaufferie urbaine.
- Cinq voies de valorisation « non destructives » : bassins de rétention, bassins infiltrants, objets moulés, sols synthétiques et équestres.

Un comité de revue critique international

Un comité international de sept vérificateurs s'est prononcé sur les choix méthodologiques ainsi que sur la validité des données utilisées et sur les résultats de l'étude.

- Henri Lecouls, expert en Analyse du Cycle de Vie et coordinateur du comité
- Jacky Bonnemains de l'association environnementale « Robin des Bois »
- Guy Castelan de Plastics Europe
- Walter Klöpffer de l'International Journal of Life Cycle Analysis
- Didier Laffaire de l'ATILH (Association Technique Industrie des Liantes Hydrauliques)
- Lars-Gunnar Lindfors, IVL (Swedish Environmental Research Institute)
- Jean-Sébastien Thomas du Groupe Arcelor Mittal

Le rapport de revue critique daté du 21 novembre 2009 est publié en intégralité dans le rapport complet de l'étude.

Les commentaires formulés lors de la revue critique ont notamment conduit à :

- mieux distinguer les voies de valorisation destructives des non destructives
- présenter les références des études toxicologiques faites par Aliapur
- faire une analyse de sensibilité sur l'affectation de l'énergie matière
- mieux justifier les durées de vie des sols à usages sportifs
- clarifier le modèle du procédé fonderie

Des discussions de fond ont également porté sur les frontières des systèmes, et plus particulièrement sur la fin de vie des valorisations non destructives de PUNR.

SECTION II – La méthodologie

1. Système étudié et unité fonctionnelle

Le schéma ci-dessous présente les étapes mises en œuvre pour les neuf voies de valorisation des PUNR étudiées. Elles ont toutes été prises en compte dans l'évaluation. Sont également indiqués les produits « traditionnels » auxquels les PUNR se substituent.

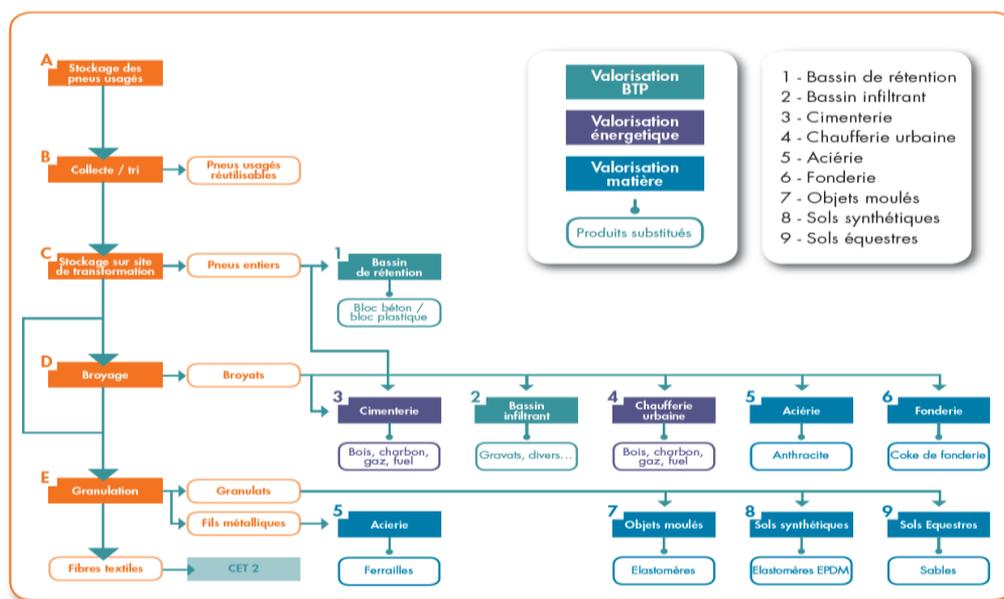


Figure 1 : schéma des différentes voies de valorisation des PUNR étudiées

Pour l'ensemble des voies de valorisation, les impacts environnementaux sont calculés pour un même service rendu : « valoriser une tonne de pneus usagés non réutilisables à partir du point de collecte »

2. Huit indicateurs environnementaux caractéristiques

Huit indicateurs reconnus en matière d'Analyse du Cycle de Vie ont été retenus, ils constituent un jeu d'indicateurs suffisamment complet pour remplir les objectifs de l'étude :

- Consommation d'énergie primaire totale
- Consommation de ressources non renouvelables
- Consommation d'eau
- Contribution à l'eutrophisation¹
- Emissions de gaz à effet de serre d'origine fossile (direct, 100 ans)
- Création d'ozone troposphérique²
- Emissions de gaz acidifiants
- Production de déchets non dangereux

La prise en compte des effets toxiques et écotoxiques est présentée au chapitre 5 ci-après.

¹ L'eutrophisation d'un milieu aqueux se caractérise par l'introduction de nutriments, sous la forme de composés azotés et phosphatés par exemple, qui conduit à la prolifération d'algues et à l'asphyxie du milieu aquatique.

² Sous certaines conditions climatiques, les émissions atmosphériques des industries et des transports peuvent réagir de manière complexe sous l'effet des rayons solaires et conduire à la formation d'un smog photochimique. Une succession de réactions impliquant des composés organiques volatiles et des oxydes d'azote conduit à la formation d'ozone, composé super oxydant.

3. Méthode des impacts évités

La méthode d'évaluation s'appuie sur les principes méthodologiques de l'Analyse du Cycle de Vie et sur ceux qui font référence pour les études portant sur la gestion des déchets ménagers.

Ainsi, le bilan environnemental des différentes voies de valorisation des PUNR est établi pour chacun des indicateurs environnementaux en sommant :

- Les impacts directs générés par les étapes nécessaires à la valorisation des pneus: collecte, préparation des PUNR ainsi que l'étape de valorisation en tant que telle
- Les impacts évités du fait de la substitution des PUNR à des produits "traditionnels".

L'objectif étant de comparer deux solutions, une voie traditionnelle et une voie alternative à base de PUNR, les étapes identiques aux deux solutions comparées ne sont pas prises en compte dans la mesure où elles n'opèrent aucune différenciation sur le bilan environnemental.

A titre d'illustration, dans le cas d'une valorisation en cimenterie, la substitution des pneus aux combustibles traditionnels permet :

- D'éviter les étapes d'extraction et de préparation de ces combustibles traditionnels, l'approvisionnement de ces combustibles traditionnels et le broyage des combustibles solides
- De substituer les émissions CO₂ fossiles dues à la combustion des combustibles traditionnels par des émissions CO₂ fossiles et CO₂ biomasses dues à la combustion des pneus usagés
- De valoriser l'acier contenu dans les PUNR

4. Affectation de l'énergie matière contenue dans les pneus

Les pneus usagés contiennent de l'énergie matière, susceptible d'être mobilisée sous forme thermique, exprimée au travers de leurs PCI (Pouvoir Calorifique Inférieur). Cette énergie matière ayant été initialement prélevée dans l'environnement, il convient donc de déterminer à qui affecter cette consommation.

Les pneus usagés en fin d'utilisation ayant un statut de déchet au sens de la réglementation actuelle, il a été considéré dans cette étude que la consommation d'énergie matière du pneu devait être comptabilisée à la charge de celui qui a conduit le pneu à passer du statut de produit à celui de déchet.

Le pneu usagé est donc doté d'un potentiel réel, son PCI, considéré comme gratuit du point de vue de la comptabilité environnementale pour les étapes qui succèdent à cet acte d'abandon.

Le comité de revue critique a attiré l'attention sur l'importance du choix de cette méthode d'affectation qui a nécessairement une influence sur les résultats de l'indicateur « consommation d'énergie primaire totale ». Par conséquent, une analyse de sensibilité a été réalisée en prenant le scénario suivant : 50% de la consommation d'énergie matière du pneu est imputée à celui qui abandonne le pneu, les 50 % restant à la voie de valorisation PUNR (voir Section IV).

5. Evaluation des impacts toxiques et écotoxiques et autres études préalables menées par Aliapur

L'évaluation des impacts toxiques et écotoxiques sur les étapes sensibles a été faite en amont de cette étude. Aliapur a en effet conduit de nombreuses expérimentations visant à évaluer l'impact toxique et écotoxique qui pourrait être associé à certaines étapes clefs des voies de valorisation matière des gazons synthétiques, bassins de rétention et bassins infiltrants.

Plutôt que d'appliquer les indicateurs de toxicité et d'écotoxicité utilisés dans le cadre des analyses du cycle de vie (par ailleurs jugés non robustes) pour rendre compte du potentiel toxique ou écotoxique associé aux différentes voies de valorisation étudiées, nous avons jugé plus pertinent de rappeler ci-après les résultats principaux des expérimentations conduites par Aliapur. Le comité de revue critique accepte cette présentation des effets toxiques et écotoxiques.

a) Gazons synthétiques

Aliapur a conduit des études afin d'évaluer le gazon synthétique à base de PUNR du point de vue de son comportement à la lixiviation et de ses émissions dans l'air :

- Essais de lixiviation sur des systèmes complets (fibres, sable, colle et matériaux de remplissage) de gazons synthétiques (EPDM, PUNR) ;
- Caractérisation physico-chimique des lixiviats ;
- Tests écotoxiques sur les lixiviats ;
- Mesure des émissions dans l'air des COV et du formaldéhyde ; ces mesures ont en outre permis de réaliser des études sanitaires INERIS selon plusieurs scénarios types d'exposition.

Les sols testés sont comparables du point de vue de ces différents indicateurs et les tests écotoxiques réalisés n'ont pas mis en avant d'écotoxicité des lixiviats. Les émissions de COV sont un peu plus importantes dans le cas des sols en EPDM que des sols à base de PUNR.

Une synthèse de cette étude peut-être consultée à l'adresse suivante :

http://www.aliapur.fr/media/files/RetD_new/Etude_gazon_copy.pdf

b) Bassins de rétention et bassins infiltrants

La valorisation des PUNR dans des bassins de rétention a fait l'objet d'études poussées de la part d'Aliapur. Ces études ont été réalisées par le groupement scientifique EEDEMS ; elles consistent dans la réalisation d'une expérimentation in situ avec : suivi de la lixiviation à long terme, caractérisation chimique des lixiviats et tests d'écotoxicité (test daphnies NF EN ISO 6341, tests vers de terre NF EN ISO 17512-1, test algues NF T90-375 et test orge NF X31-201) sur ces mêmes lixiviats. Afin de reproduire les effets d'un arrosage régulier d'espaces verts engazonnés, des essais ont également été menés à plus long terme sur des espèces végétales terrestres du type gazon Ray Grass.

L'ensemble de ces essais n'a révélé aucun problème qui pourrait s'apparenter à une contamination des eaux avec lesquels les PUNR se trouvent en contact :

- Du point de vue de la caractérisation physico-chimique, l'analyse des résultats montre que les différentes substances recherchées (métaux, hydrocarbures, ...) sont toujours à des concentrations inférieures aux valeurs limites légales de référence et inférieures aux valeurs limites de potabilisation des eaux.
- Les essais écotoxiques n'ont montré aucune toxicité de l'eau du bassin de rétention à court et moyen terme.

- Les essais sur les gazons n'ont montré aucun impact sur la germination et la croissance.

Des informations supplémentaires relatives à ces études peuvent être consultées à l'adresse suivante :

http://www.aliapur.fr/media/files/RetD_new/Plaquette_bassins_de_retention.pdf

c) Sols équestres

Concernant les sols équestres, des mesures de particules dans l'air ont été réalisées au cours des essais effectués sur les sols équestres à base de granulats de PUNR ; ces mesures ont été faites par un système au laser.

Ces mesures ont permis de montrer que l'un des intérêts majeurs des sols équestres à base de granulats de PUNR est que ce type de sol émet moins de poussières dans l'air que les sols traditionnels à base de sable (le sable ayant quant à lui tendance à se déliter sous l'effet du martèlement des sabots des chevaux, provoquant une poussière importante et conduisant à des arrosages fréquents pour limiter ces envols).

6. Devenir des produits en fin de vie

Des discussions de fond avec le comité de revue critique ont porté sur les frontières des systèmes étudiés, et plus particulièrement sur la fin de vie des valorisations non destructives de PUNR.

Les vérificateurs considèrent que la fin de vie des valorisations non destructives aurait du être prise en compte. Ils estiment de plus, qu'en l'absence de cette prise en compte, les voies de valorisation destructives ne peuvent pas être comparées aux voies non destructives qui devraient faire l'objet de comparaisons séparées.

Les auteurs de l'étude expliquent que le choix de ne pas prendre en compte la fin de vie des voies non destructives s'appuie sur le fait que :

- L'unité fonctionnelle porte sur la valorisation d'une tonne de PUNR et non pas sur la destruction d'une tonne de PUNR ;
- Les études environnementales relatives à la gestion des emballages ménagers ne comptabilisent jamais la fin de vie des voies de valorisation non destructives ; par exemple, le bilan environnemental associé au recyclage de la bouteille PET sous forme de fibre polaire ne comptabilise pas la fin de vie des produits en fibre polaire ; dans ce cadre, les voies de valorisation par incinération avec récupération d'énergie sont comparées aux voies de valorisation par recyclage.
- La prise en compte de la fin de vie, qui combinerait par exemple des opérations de démantèlement/tri et une valorisation énergétique des pneus et broyats de pneus, conduirait probablement à une amélioration des résultats. L'option de comptabilisation qui a été retenue correspond ainsi à une hypothèse conservative.

Les auteurs de l'étude s'accordent avec le comité de revue critique pour recommander qu'un programme de recherche soit engagé sur la fin de vie des voies de valorisation non destructives.

SECTION III – Panorama des résultats et conclusions

1. Existence d'un bénéfice environnemental pour la majorité des voies de valorisation étudiées

Bilan environnemental global =

[Impacts générés par les étapes nécessaires à la valorisation des PUNR] — [Impacts évités par substitution des PUNR à des produits "traditionnels"]

Indicateurs	Bilan environnemental								
	Gazon synthétique	Objet moulé	Cimenterie	Acierie	Chaufferie urbaine	Sol équestre	Bassin de rétention	Bassin infiltrant	Fonderie
Consommation d'énergie primaire totale (en GJ)	-74	-63	-43	-54	-33	-4	-10	0 ^(*)	-29 ^(*)
Emissions de gaz à effet de serre d'origine fossile (direct, 100 ans) (en kg éq. CO ₂)	-3 217	-2 703	-1 466	-672	-1 275	-342	-448	-11	-1 193 ^(*)
Emissions de gaz acidifiants (en g éq. SO ₂)	-10 589	-20 425	-7 031	-2033	-1 499	-1 557	-1 083	18 ^(*)	-4 115 ^(*)
Emissions de gaz contribuant à la création d'ozone troposphérique (en g éq. éthylène)	-759	-204	-92	-193	1 ^(*)	-156	-73	0 ^(*)	-301 ^(*)
Consommation de ressources non renouvelables (en kg éq. antimoine)	-33	-26	-21	-26	-17	-3	-4	0	-20 ^(*)
Consommation d'eau (en m ³)	-15	-41	-12	-2	0	-28	-1.3	0	-6 ^(*)
Rejets contribuant à l'eutrophisation (en g éq. PO ₄)	-747	-1 838	-327	-77	-27	-270	14 (*)	21	-234 ^(*)
Production de déchets (en t)	-4	0	0	-1	-1	-29	-	0	-1 ^(*)

^(*) Ecart non significatif lors que le bilan global calculé est inférieur à la plus grande des deux valeurs suivantes : 10% du total des impacts générés, 10% du total des impacts évités

Tableau 1 – Bilan environnemental des 9 voies de valorisation étudiées pour 1 tonne de PUNR valorisée

Les bilans environnementaux calculés montrent que dans les conditions techniques actuelles la quasi totalité des voies de valorisation étudiées engendrent des bénéfices environnementaux et ceci quel que soit l'impact considéré.

La comparaison des résultats des différentes voies conduit à distinguer trois groupes principaux :

- La production de gazon synthétique, la fabrication d'objets moulés et la cimenterie apparaissent comme étant les voies les plus intéressantes sur l'ensemble des indicateurs environnementaux étudiés.
- Les bassins de rétention et les bassins infiltrants constituent des voies de valorisation dont les bénéfices restent relativement minimes.
- Les autres voies de valorisation présentent des bénéfices qui se situent sur une plage intermédiaire entre ces deux premières catégories ; leurs avantages s'avèrent plus ou moins marqués selon les indicateurs considérés.

Remarque : la valorisation en fonderie est une filière émergente, les données utilisées pour la présente étude sont issues d'essais industriels qui mériteraient d'être confirmés. Sur la base des données actuellement disponibles, les bénéfices générés par la valorisation de PUNR en fonderie ont été jugés non significatifs.

Dans le cas particulier de la consommation d'énergie primaire totale, l'analyse de sensibilité consistant à affecter la moitié de l'énergie matière des pneus à la voie de valorisation confirme la robustesse des résultats obtenus pour les voies de valorisation en gazons synthétiques, objets moulés, cimenterie, aciérie et chauffage urbain. Elle conduit en revanche à relativiser les performances des autres voies de valorisation sur cet indicateur (voir section IV, chapitre 2).

De manière générale, les bénéfices apportés par la valorisation des PUNR découlent d'un effet de substitution à des matières énergivores, d'un effet d'évitement de la production et du transport de certaines matières substituées lorsque la durée de vie des produits PUNR est supérieure à celles des produits substitués mais également du contenu biomasse des pneus usagés.

2. Contribution des étapes de transport et de préparation des PUNR

Indicateurs	Etapes	Impacts des étapes de transport et de préparation des PUNR (pour une tonne de PUNR)	Impacts évités pour les différentes voies étudiées (pour une tonne de PUNR)							
			Gazon synthétique	Objet moulé	Cimenterie	Acierie	Chaufferie urbaine	Sol équestre	Bassin de rétention	Bassin infiltrant
Consommation d'énergie primaire totale (en GJ)		0,5 à 3,2	-87	-66	-45	-55	-34	-9,5	-12	-1
Emissions de gaz à effet de serre d'origine fossile (direct, 100 ans) (en kg éq. CO ₂)		44 à 95	-3 642	-2 794	-3 354	-2406	-3 149	-544	-657	-68
Emissions de gaz acidifiants (en g éq. SO ₂)		257 à 630	-12 798	-20 961	-7 662	-2486	-1 965	-2 880	-2 413	-301
Emissions de gaz contribuant à la création d'ozone troposphérique (en g éq. éthylène)		6 à 11,5	-807	-215	-102	-202	-9	-172	-101	-7
Consommation de ressources non renouvelables (en kg éq. antimoine)		0,2 à 0,5	-37	-26,5	-22	-26	-17,5	-4,4	-5,2	-0,4
Consommation d'eau (en m ³)		0 à 0,6	-17	-41,2	-12	-2	0	-30	-1,5	-0,1
Rejets contribuant à l'eutrophisation (en g éq. PO ₄)		62 à 116	-984	-1 935	-443	-180	-134	-450	-298	-54
Production de déchets (en t)		0 à 0,2	-4,5	-0,45	0	-1	-1	-29	-1	0

Tableau 2 – Mise en perspective des impacts générés par les étapes de transport et de préparation des PUNR par rapport aux impacts évités grâce à la substitution

Comme le souligne le tableau ci-dessus, les impacts générés par les étapes communes de transport et de préparation des PUNR (collecte et autres étapes de transport, tri, broyage, granulation) restent faibles par rapport à l'ordre de grandeur des impacts évités, et ceci pour les huit indicateurs analysés.

3. Conclusions

Les résultats obtenus pour les neuf voies de valorisation étudiées, montrent qu'il est toujours intéressant d'investir dans les étapes amont que constituent la collecte, le tri et le broyage/granulation pour essayer de valoriser le potentiel des pneus usagés.

Une politique de gestion des pneus usagés qui repose sur la combinaison de ces différentes voies conduit donc à dégager des bénéfices environnementaux.

Tout en approuvant cette conclusion générale, le comité de revue critique recommande que la fin de vie des voies de valorisation non destructives soit étudiée.

Les résultats obtenus permettent également de relativiser la hiérarchie des déchets mentionnée dans le cadre de la Directive 2008/98/CE relative aux déchets. Il apparaît en effet que les voies de recyclage ne présentent pas de manière systématique des bilans environnementaux plus intéressants que les voies de valorisation énergétique.

4. Présentation graphique des bilans environnementaux pour les huit indicateurs et les neuf voies étudiés

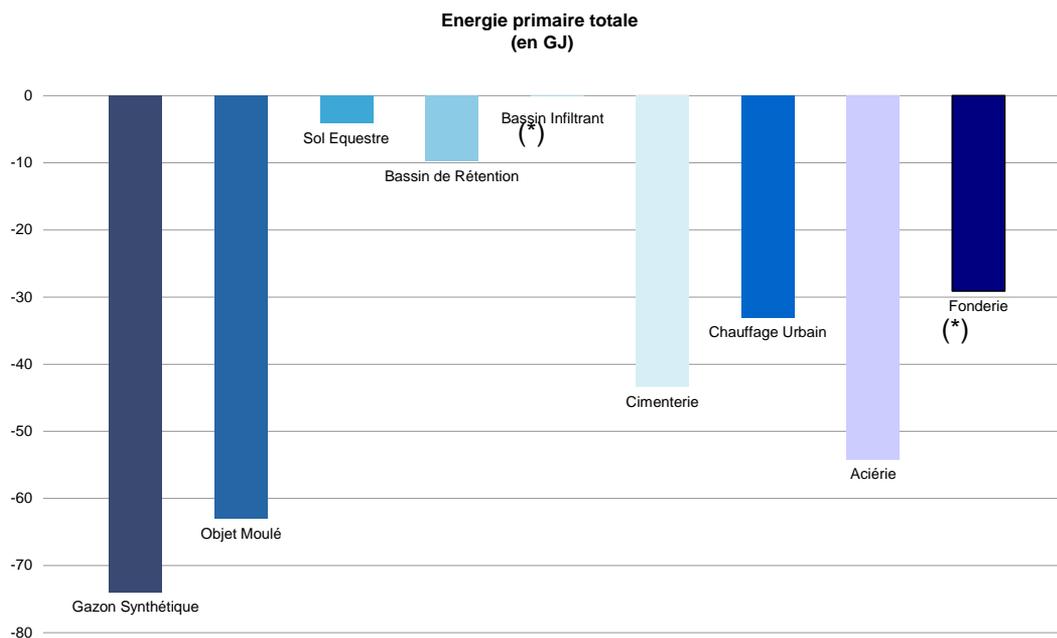


Figure 2 : Bilan environnemental pour la consommation d'énergie primaire totale (GJ/tonne de PUNR)

(*) Ecart non significatif inférieur à 10% du total : des impacts générés par la valorisation ou des impacts évités

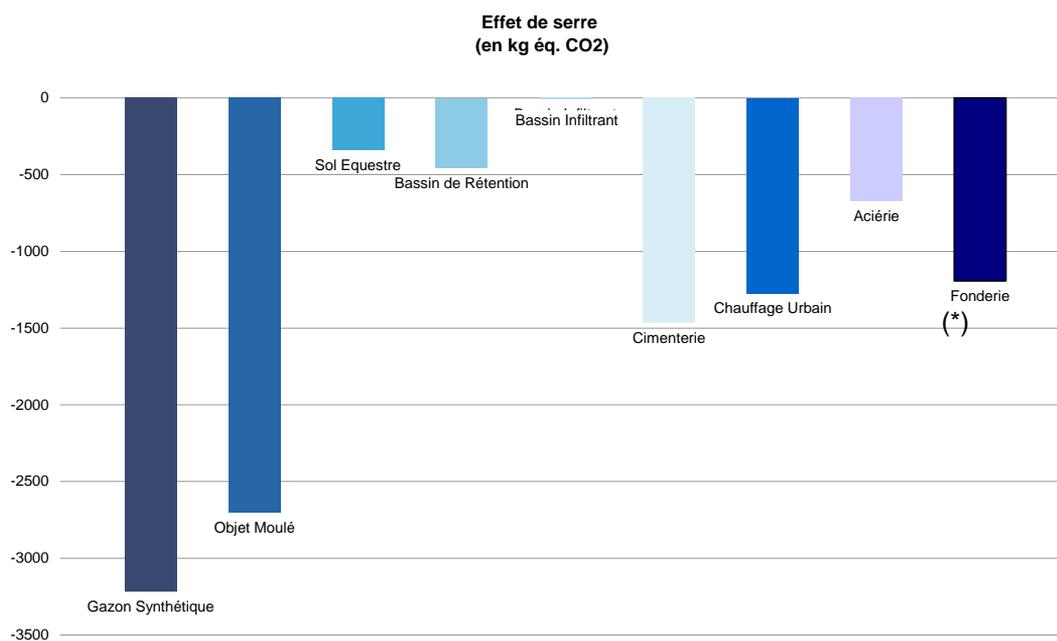


Figure 3 : Bilan environnemental pour les émissions de gaz à effet de serre (kg éq. CO₂/tonne de PUNR)

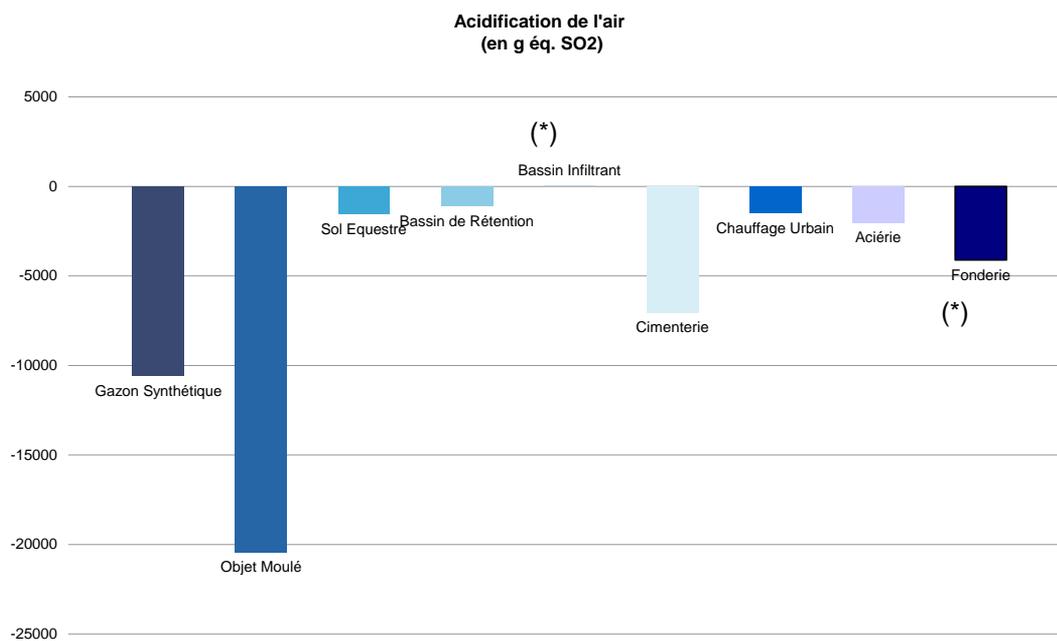


Figure 4 : Bilan environnemental pour les émissions de gaz à acidifiants (kg éq. SO₂/tonne de PUNR)

(*) Ecart non significatif inférieur à 10% du total : des impacts générés par la valorisation ou des impacts évités

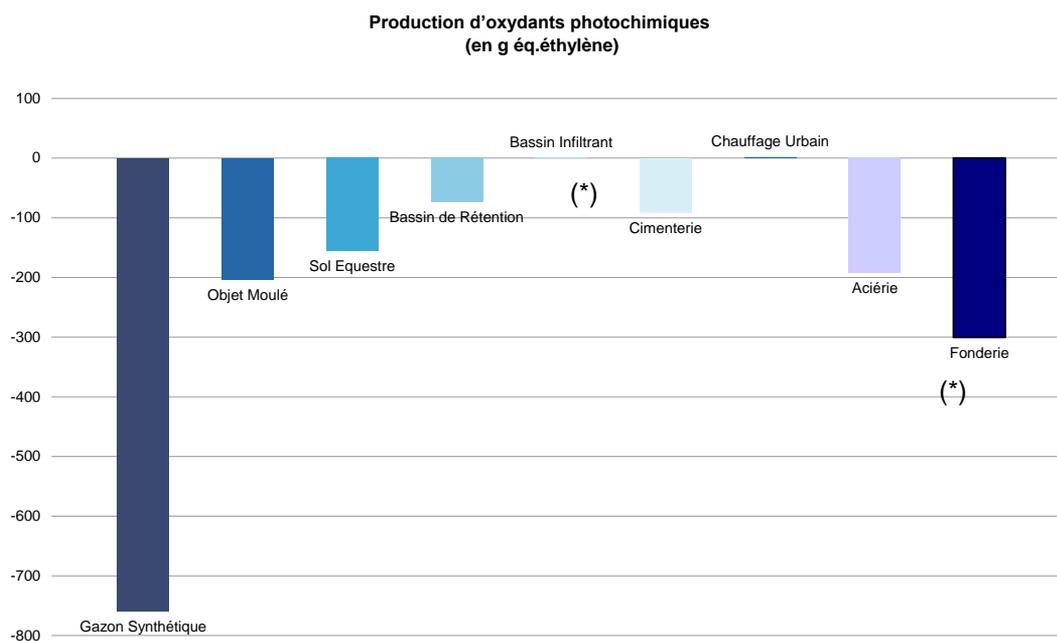


Figure 5 : Bilan environnemental pour les émissions de gaz à contribuant à la création d'ozone troposphérique (g éq. éthylène/tonne de PUNR)

Consommation de ressources non renouvelables

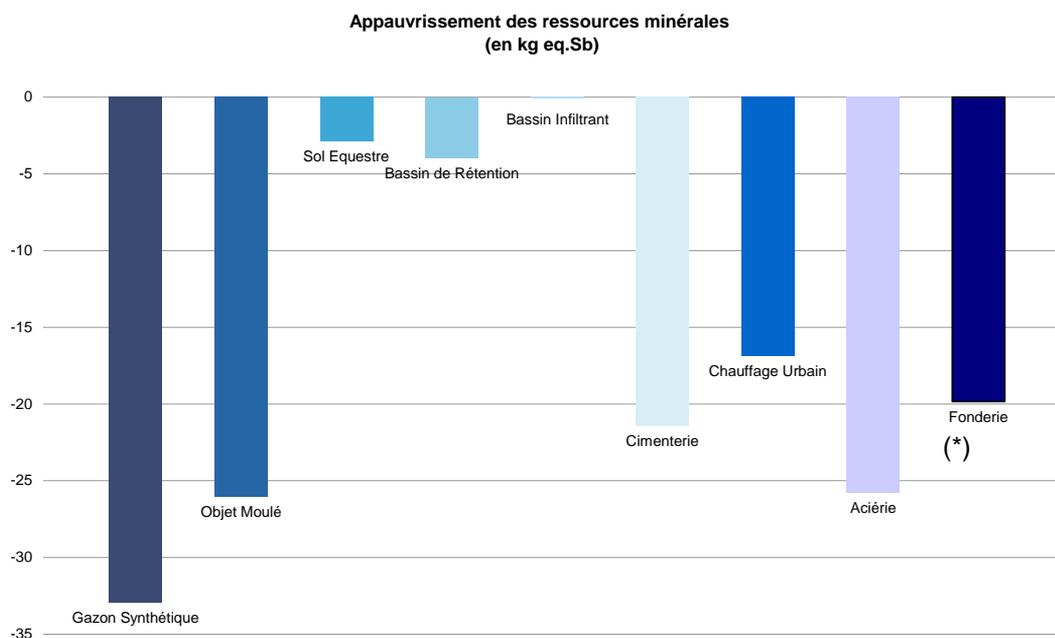


Figure 6 : Bilan environnemental pour la consommation de ressources non renouvelables (kg éq. antimoine /tonne de PUNR)

(*) Ecart non significatif inférieur à 10% du total : des impacts générés par la valorisation ou des impacts évités

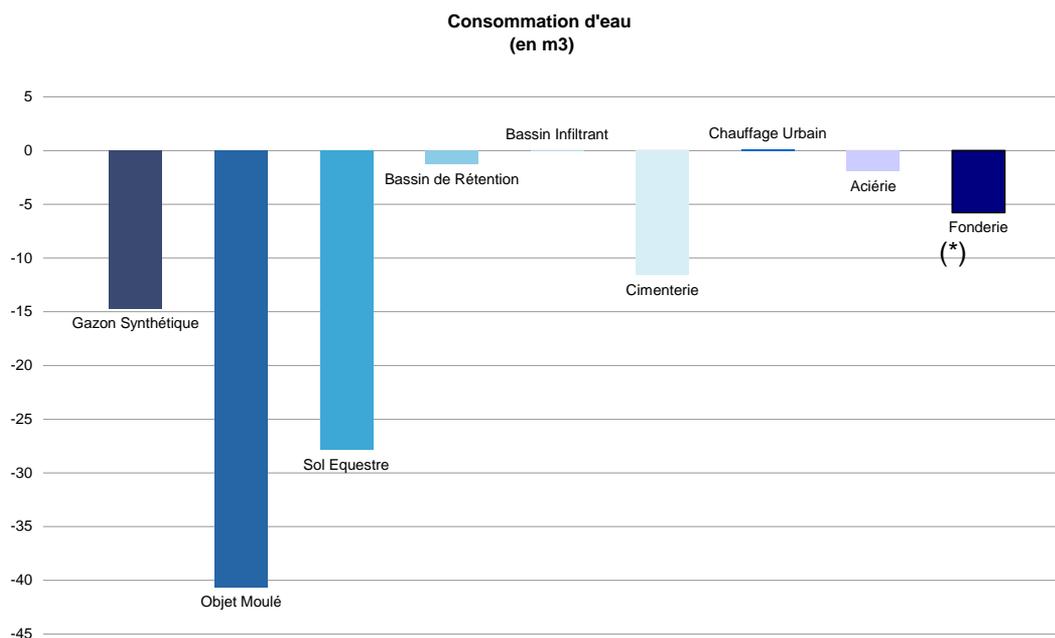


Figure 7 : Bilan environnemental pour la consommation d'eau (m³ /tonne de PUNR)

Rejets contribuant à l'eutrophisation

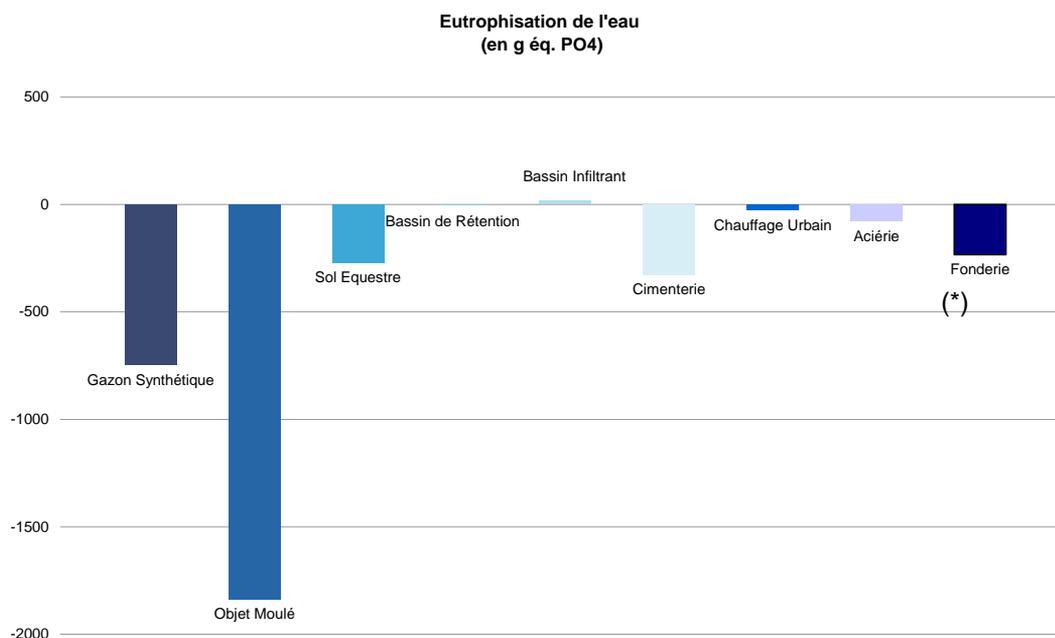


Figure 8 : Bilan environnemental pour les rejets contribuant à l'eutrophisation (g. éq. PO₄/tonne de PUNR)

(*) Ecart non significatif inférieur à 10% du total : des impacts générés par la valorisation ou des impacts évités

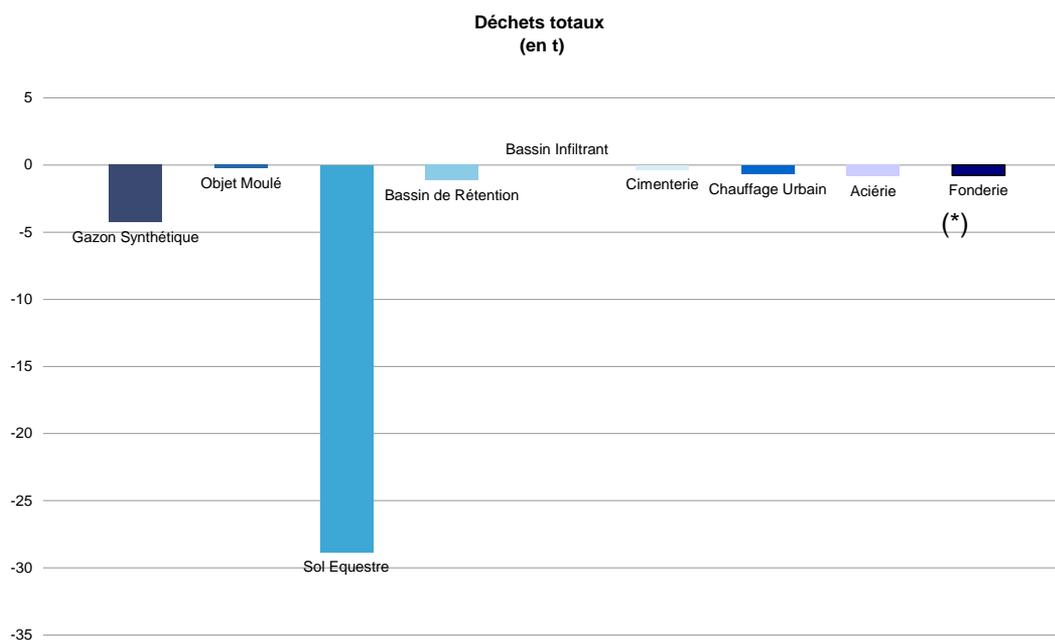


Figure 9 : Bilan environnemental pour la production de déchets totaux (tonnes/tonne de PUNR)

SECTION IV – Pour aller plus loin sur la méthodologie

1. Taux de substitution

La valorisation des PUNR permet d'assurer de manière alternative un service dont l'offre nécessite habituellement la consommation de ressources traditionnelles.

Les informations collectées auprès des différents contributeurs ont ainsi permis d'établir le taux de substitution relatif à chaque voie.

Voie de valorisation des PUNR	Taux de substitution pour un service équivalent et une même durée de vie <i>1 tonne de PUNR se substitue à :</i>	Durée de vie du produit à base de PUNR et du produit traditionnel
Bassins de rétention	1,95 t de blocs béton ou 0,3 t de polyéthylène	Durées de vie similaires (20 ans)
Bassins infiltrants	6 t de grave	Durées de vie similaires (20 ans)
Objets moulés	1 t de polyuréthane vierge	Durées de vie similaires
Sols synthétiques	0,5 t d'EPDM vierge et 2 t de craie	PUNR : 10 ans, EPDM : 4 ans
Sols équestres	44 t de sable	PUNR : 10 ans, sable : 3 ans
Cimenterie	0,7 t de coke et 0,29 t de charbon	Sans objet Voies destructives
Chaufferie urbaine	1,15 t de charbon	
Aciérie	0,59 t d'anhracite et 0,16 t de ferraille	
Fonderie	(1000 t de ferrailles + 9,5 t de coke + 1 t de PUNR) se substitue à (1002 t de ferrailles + 10 t de coke)	

Tableau 3 : Taux de substitution des différentes voies de valorisation PUNR

N. B. : A titre d'information, un terrain de foot utilise environ 150 tonnes de granulats de PUNR, un manège équestre environ 30 tonnes, une cimenterie peut consommer plusieurs dizaines de milliers de tonnes par an.

2. Analyses de sensibilité

Différentes analyses de sensibilité ont été réalisées dans le cadre de cette étude pour apprécier l'incidence de certains choix techniques mais aussi la robustesse des résultats.

Ainsi, ces analyses ont porté sur les aspects suivants :

- l'affectation de l'énergie matière des pneus
- l'incidence du choix de technique de granulation (techniques actuellement utilisées en France versus granulation par cryogénie)
- les impacts d'eutrophisation de certaines solutions substituées

D'autres analyses, spécifiques à une voie de valorisation, ont été conduites. Les enseignements apportés sont mentionnés dans les focus par voie de valorisation présentés en section V.

a) Analyse de sensibilité concernant la prise en compte de l'énergie matière

Dans le cadre de cette étude, l'énergie matière contenue dans les pneus est comptabilisée à la charge de celui qui a conduit le pneu à passer du statut de produit à celui de déchet, et non à charge de la voie de valorisation des PUNR.

Comme l'illustre le tableau ci-dessous, l'affectation de la moitié de l'énergie matière des pneus aux voies de valorisation des PUNR conduit à une évolution des résultats sur cet indicateur.

Voie de valorisation	Consommation d'énergie primaire (GJ/t)	
	0% de l'énergie matière des PUNR affecté à la voie de valorisation	50 % de l'énergie matière des PUNR affectés à la voie de valorisation
Gazon Synthétique	-74	-60
Objet Moulé	-63	-49
Sol Equestre	-4	10
Bassin de Réention	-10	5
Bassin Infiltrant	0	14
Cimenterie	-43	-28
Chauffage Urbain	-33	-18
Acierie	-54	-40
Fonderie	-29	-16

Tableau 4 – Résultats de l'analyse de sensibilité sur la prise en compte de l'énergie matière des pneus

Cette analyse de sensibilité consistant à affecter la moitié de l'énergie matière des pneus à la voie de valorisation des PUNR **permet de confirmer la robustesse des résultats obtenus pour les voies de valorisation en gazons synthétiques, objets moulés, cimenterie, aciérie et chauffage urbain.**

Elle conduit également à relativiser les performances des autres voies de valorisation pour l'indicateur « consommation d'énergie primaire ». Ceci s'explique par le caractère faiblement consommateur d'énergie des solutions traditionnelles substituées, ces dernières utilisant des matériaux à contenu énergétique faible voire nul (sable, graves, blocs béton).

b) Analyse de sensibilité concernant le procédé de granulation

La granulation par cryogénie n'est pas utilisée en France : les sites disposant de cette technologie sont situés au Portugal. La Hollande met également partiellement en œuvre cette technologie.

Au travers de cette analyse complémentaire, nous souhaitons mettre en évidence les différences existant sur le plan environnemental entre cette technique de granulation et les techniques utilisées en France (granulation par écrasement et par broyages successifs).

Indicateurs	Scénario	Scénario de référence	Cryogénie
Consommation d'énergie primaire totale (en GJ)		3	9
Emissions de gaz à effet de serre d'origine fossile (direct, 100 ans) (en kg éq. CO ₂)		39	369
Emissions de gaz acidifiants (en g éq. SO ₂)		243	2 031
Emissions de gaz contribuant à la création d'ozone troposphérique (en g éq. éthylène)		5,1	15,7
Consommation de ressources non renouvelables (en kg éq. Sb)		0,3	2,5
Consommation d'eau (en m ³)		0,66	9,40
Rejets contribuant à l'eutrophisation (en g éq. PO ₄)		23	115
Production de déchets (en t)		0,34	0,66

Tableau 5 – Comparaison des impacts environnementaux générés par différentes techniques de granulation

Les résultats de cette analyse sont présentés pour l'étape de granulation uniquement, avec un flux de référence de 1 tonne de pneus entrant en granulation. Le scénario de référence correspond à la répartition française existant entre les techniques de broyages successifs et écrasement.

Signalons que cette comparaison ne prend pas en compte la différence de qualité entre les granulats produits.

L'augmentation des impacts entre les techniques de granulation par broyages successifs ou par écrasement d'une part et la granulation par broyage cryogénique d'autre part est importante.

Cette augmentation des impacts est essentiellement due à une consommation énergétique importante au niveau des machines et à la production et au transport de l'azote liquide nécessaire à la granulation par broyage cryogénique.

3. Modélisation des étapes de transport des pneus usagés

Un travail approfondi de modélisation a été réalisé afin de caractériser les étapes de transport des pneus usagés. Le cheminement des PUNR depuis les détenteurs jusqu'à la valorisation est en effet constitué des étapes suivantes :

- Collecte des pneus usagés des détenteurs vers les centres de tri : 40 000 points de collecte, environ 90 centres de tri
- Transfert des PUNR des centres de tri vers les plateformes de transformation (broyage / granulation). Pour la majorité des cas, le tri et la transformation se font sur le même site, ce transfert n'a donc pas lieu.
- Transport des PUNR vers les valorisateurs. Deux cas peuvent se présenter :
 - les PUNR sont acheminés par route vers les valorisateurs (France)
 - si la valorisation a lieu à l'étranger (cimenterie, chaufferie urbaine), les pneus transitent au préalable par des plateformes de transit avant envoi par bateau puis éventuellement un transport par la route jusqu'au valorisateur.

La consommation de carburant associée à une étape de transport a été évaluée selon la formule suivante :

Consommation réelle (en litres) =

$$\text{Distance} \times \frac{\text{consommation pleine charge}}{100} \times \left[\frac{2}{3} + \frac{1}{3} \times \frac{\text{charge réelle}}{\text{charge utile}} + \text{taux de retour à vide} \times \frac{2}{3} \right]$$

Concernant l'étape de collecte depuis les détenteurs jusqu'aux centres de tri, le traitement systématique des bons de livraison relatifs à l'année 2008 a permis :

- de calculer la distance de transport spécifique à chaque bon de livraison
- de constituer des « catégories de transport » homogènes grâce à l'analyse de la distribution des tonnages collectés et des kilomètres parcourus
- de déterminer les valeurs des différents paramètres de modélisation

Les analyses ainsi réalisées ont montré la nécessité d'établir des jeux de données différents (tonnage transporté, distance parcourue) pour les collectes en « benne » et en « vrac ». En revanche, il n'a pas été utile de distinguer les collectes en fonction des catégories de pneus.

	Benne	Vrac
Tonnage total (t)	142 000	127 000
Distance (km)	77	74
Charge réelle transportée (t)	4	1.4
Charge utile (t)	12	3
Consommation pour 100 km à plein (L)	34	15
Retour à vide (hypothèse majorante)	100%	100%
Consommation à la tonne (L)	9.5	12

Tableau 7 : Paramètres de modélisation de la collecte des détenteurs vers les centres de tri

De la même façon, ces paramètres ont été déterminés pour les autres étapes de transports des PUNR.

SECTION V – Pour aller plus loin sur chacune des voies de valorisation

1. Focus sur les étapes de transport

Compte tenu de l'organisation logistique nécessaire à la gestion des pneus usagés et de l'intérêt porté par de nombreuses parties prenantes aux impacts environnementaux des transports, et en particulier à l'effet de serre, nous avons souhaité évaluer la contribution cumulée de l'ensemble des étapes de transport des PUNR pour cet indicateur.

Les étapes de transport prises en compte pour les calculs sont les suivantes :

- Transport par route des pneus depuis les 40 000 points de collecte jusqu'aux 90 centres de tri
- Transport par route des PUNR des centres de tri vers les plateformes de transformation (broyage / granulation).
- Transports depuis les centres de tri ou de transformation vers les valorisateurs situés en France (par route) et à l'étranger (bateau et route)

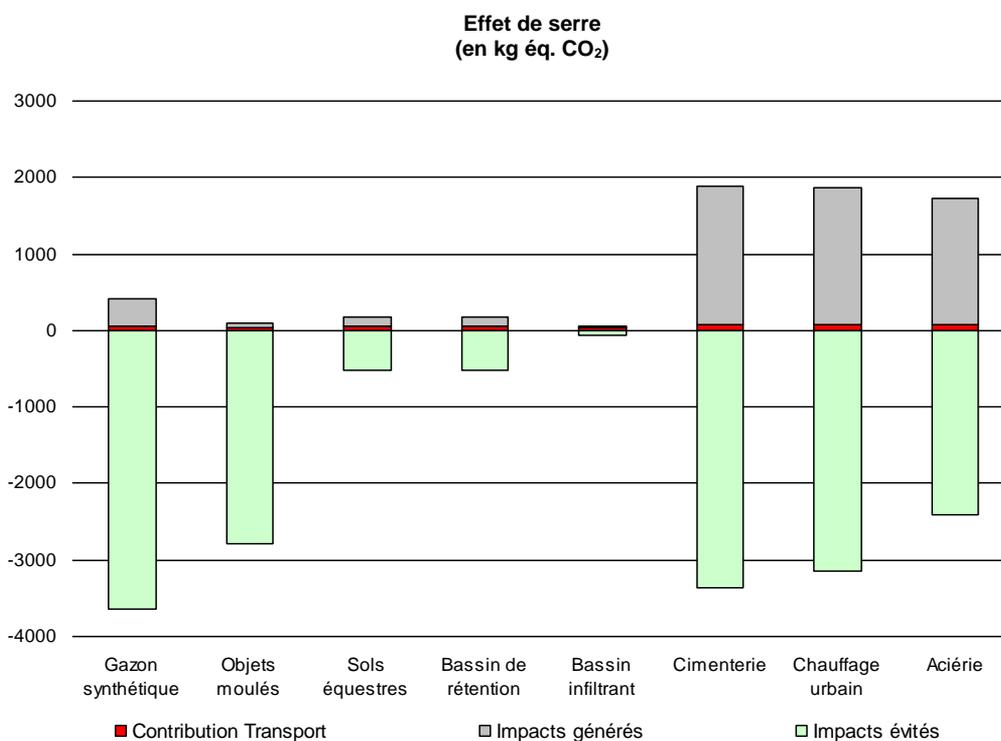


Figure 10 : Indicateur gaz à effet de serre - impacts générés, contribution des étapes de transport et impacts évités pour les différentes voies de valorisation étudiées

Pour la grande majorité des voies de valorisation, les résultats montrent que les étapes de transport ont une contribution environnementale secondaire (de 45 à 84 kg éq. CO₂/ tonne de PUNR) par rapport aux impacts générés par les voies de valorisation et que les impacts des transports sont très inférieurs aux bénéfiques générés par la substitution des pneus à des produits traditionnels.

2. Focus sur les voies non destructives

Focus sur les gazons synthétiques

Indicateurs	Scénarios	Bilan global	Impacts générés par la valorisation		Impacts évités (effet de substitution)
			Total	dont étapes de transport et de préparation	
Consommation d'énergie primaire totale (en GJ)		-74	13	3	-87
Emissions de gaz à effet de serre d'origine fossile (direct, 100 ans) (en kg éq. CO ₂)		-3 217	425	91	-3 642
Emissions de gaz acidifiants (en g éq. SO ₂)		-10 589	2 209	536	-12 798
Emissions de gaz contribuant à la création d'ozone troposphérique (en g éq. éthylène)		-759	48	11	-807
Consommation de ressources non renouvelables (en kg éq. antimoine)		-33	5	0,5	-37
Consommation d'eau (en m ³)		-15	2	0,6	-17
Rejets contribuant à l'eutrophisation (en g éq. PO ₄)		-747	237	97	-984
Production de déchets (en t)		-4,3	0,2	0,2	-4,5

Un gazon synthétique est composé d'un tapis d'herbe synthétique dans lequel a été ajouté un lit de lestage en sable recouvert d'une couche de granulats libres.

Le bilan environnemental est établi à partir de la comparaison d'un gazon synthétique avec un garnissage à base de granulats de PUNR et d'un gazon synthétique avec un garnissage à base de craie et de granulats en EPDM vierge. A l'échelle de la durée de vie totale d'un gazon synthétique en granulat PUNR, le taux de substitution est de 1 kg de PUNR pour 0.5 kg d'EPDM vierge et 2 kg de craie.

Pour l'ensemble des indicateurs auxquels nous nous sommes intéressés, le bilan global montre l'existence de bénéfices environnementaux significatifs.

Les étapes de transport et de préparation ont une contribution aux impacts générés par la voie de valorisation qui reste secondaire. L'étape de valorisation en tant que telle (mise en œuvre du gazon synthétique à base de granulats de PUNR) est la plus contributrice.

Une analyse centrée sur les seules étapes préalable à la valorisation montre que:

- Les étapes de transport (collecte, transfert vers broyage/granulation et vers valorisation) contribuent à hauteur de 60 à 80% aux indicateurs traduisant les émissions dans l'air (effet de serre, acidification, ozone troposphérique), émissions dans l'eau (eutrophisation) ou encore à l'épuisement des ressources non renouvelables. Ceci s'explique par la consommation d'énergie fossile des systèmes de transport.
- L'étape de granulation contribue à hauteur de 60 à 70% à la consommation d'eau et d'énergie, et à 100% de la production de déchets non dangereux.
- Les étapes de tri et de broyage n'interviennent que faiblement dans les impacts environnementaux de la valorisation du pneu dans les gazons synthétiques.

Focus sur les objets moulés

Indicateurs	Scénarios ¹	Bilan global	Impacts générés par la valorisation		Impacts évités (effet de substitution)
			Total	<i>dont étapes de transport et de préparation</i>	
Consommation d'énergie primaire totale (en GJ)		-63	3	3	-66
Emissions de gaz à effet de serre d'origine fossile (direct, 100 ans) (en kg éq. CO ₂)		-2 703	91	91	-2 794
Emissions de gaz acidifiants (en g éq. SO ₂)		-20 425	536	536	-20 961
Emissions de gaz contribuant à la création d'ozone troposphérique (en g éq. éthylène)		-204	11	11	-215
Consommation de ressources non renouvelables (en kg éq. antimoine)		-26	0,5	0,5	-26,5
Consommation d'eau (en m ³)		-40,6	0,6	0,6	-41,2
Rejets contribuant à l'eutrophisation (en g éq. PO ₄)		-1 838	97	97	-1 935
Production de déchets (en t)		-0,25	0,2	0,2	-0,45

¹Avertissement : les étapes identiques aux deux solutions comparées (ici les étapes de fabrication) ne sont pas prises en compte dans la mesure où elles n'opèrent aucune différenciation sur le bilan environnemental.

Le bilan environnemental est établi à partir de la comparaison d'un tapis anti-vibration en PUNR et d'un tapis anti-vibration en polyuréthane vierge. La durée de vie des deux tapis est la même et il n'y a pas de différence de procédé de fabrication. Le taux de substitution considéré est de 1 kg de polyuréthane vierge pour 1 kg de granulats de PUNR.

Pour l'ensemble des indicateurs auxquels nous nous sommes intéressés, le bilan global montre l'existence de bénéfices environnementaux significatifs lié au fait que l'on évite la production de polyuréthane vierge qui constitue une étape relativement impactante.

L'analyse de sensibilité réalisée sur l'affectation de l'énergie matière du PUNR montre que le bilan devient moins favorable à la filière utilisant des PUNR lorsqu'on lui affecte la moitié de l'énergie matière des pneus, celle-ci restant néanmoins bénéficiaire comparée à la filière polyuréthane vierge.

Remarque : les conclusions de l'analyse centrée sur les étapes amont à la valorisation (transports et préparation) sont similaires à celles établies pour les gazons synthétiques.

Focus sur les sols équestres

Indicateurs	Scénarios ¹	Bilan global	Impacts générés par la valorisation		Impacts évités (effet de substitution)
			Total	dont étapes de transport et de préparation	
Consommation d'énergie primaire totale (en GJ)		-4	5,5	3	-9,5
Emissions de gaz à effet de serre d'origine fossile (direct, 100 ans) (en kg éq. CO ₂)		-342	202	91	-544
Emissions de gaz acidifiants (en g éq. SO ₂)		-1 557	1 323	536	-2 880
Emissions de gaz contribuant à la création d'ozone troposphérique (en g éq. éthylène)		-156	16	11	-172
Consommation de ressources non renouvelables (en kg éq. antimoine)		-3	1,5	0,5	-4,5
Consommation d'eau (en m ³)		-28	2	0,6	-30
Rejets contribuant à l'eutrophisation (en g éq. PO ₄)		-270	180	97	-450
Production de déchets (en t)		-29	0,4	0,2	-29

¹Avertissement : les étapes identiques aux deux solutions comparées (mise en œuvre du sol support constitué d'une couche compactée de graves concassées) ne sont pas prises en compte dans la mesure où elles n'opèrent aucune différenciation sur le bilan environnemental

Le bilan environnemental de la voie de valorisation « sols équestres » a été établi à partir de la comparaison d'un sol équestre en PUNR et d'un sol équestre traditionnel en sable.

Le sol équestre en sable se différencie du sol en PUNR par une moindre durée de vie et par une épaisseur plus importante. A l'échelle de la durée de vie d'un sol équestre en granulats PUNR (10 ans), le taux de substitution est de 1 kg de PUNR pour 44 kg de sable. Ce calcul tient compte d'un taux de renouvellement de 5% par an de la couche libre de PUNR.

Pour l'ensemble des indicateurs analysés, le bilan global montre l'existence de bénéfices environnementaux pour la voie PUNR, plus ou moins marqués selon les indicateurs.

Ce constat est d'autant plus intéressant que les sols équestres en PUNR offrent de meilleures performances que les sols en sable traditionnels concernant l'émission de poussières, ainsi qu'en matière de sécurité des usagers.

Les bénéfices proviennent en majeure partie du fait qu'on évite la production et le transport de sable : l'extraction du sable de carrière contribue à hauteur de 70% aux impacts évités, les 30% restant provenant des transports vers le manège.

Dans le cas particulier de l'indicateur « consommation d'énergie primaire totale », l'analyse de sensibilité réalisée sur l'affectation de l'énergie matière montre que le bilan énergétique n'est plus favorable à la filière utilisant des PUNR lorsque la moitié de l'énergie matière du pneu lui est imputée en raison du caractère peu consommateur d'énergie de la solution traditionnelle.

L'analyse de sensibilité sur la durée de vie des sols équestres en PUNR consiste à comparer le scénario retenu à un scénario basé sur une durée de vie de 20 ans. Le taux de substitution est alors de 1kg de PUNR pour 73 kg de sable, ceci conduisant à un accroissement des bénéfices environnementaux de la voie de valorisation des PUNR.

Remarque : les conclusions de l'analyse centrée sur les étapes amont à la valorisation (transports et préparation) sont similaires à celles établies pour les gazons synthétiques.

Focus sur les bassins de rétention

Indicateurs	Scénarios ¹	Bilan global	Impacts générés par la valorisation		Impacts évités (effet de substitution)
			Total	dont étapes de transport et de préparation	
Consommation d'énergie primaire totale (en GJ)		-10	3	0,5	-13
Emissions de gaz à effet de serre d'origine fossile (direct, 100 ans) (en kg éq. CO ₂)		-448	209	44	-657
Emissions de gaz acidifiants (en g éq. SO ₂)		-1 083	1 330	257	-2 413
Emissions de gaz contribuant à la création d'ozone troposphérique (en g éq. éthylène)		-73	28	6	-101
Consommation de ressources non renouvelables (en kg éq. antimoine)		-4	1,2	0,2	-5,2
Consommation d'eau (en m ³)		-1,3	0,3	0	-1,6
Rejets contribuant à l'eutrophisation (en g éq. PO ₄)		14 (*)	312	62	-298
Production de déchets (en t)		- 1	0	0	- 1

¹Avertissement : les étapes identiques aux deux solutions comparées (ex: production des drains, de la géomembrane et du complexe d'étanchéité) ne sont pas prises en compte dans la mesure où elles n'opèrent aucune différenciation sur le bilan environnemental

(*) Ecart non significatif car inférieur à 10% du total des impacts générés par la valorisation

Le bilan environnemental est établi à partir de la comparaison entre la valorisation de PUNR entiers pour la construction de bassins de rétention et des solutions faisant appel à des matériaux traditionnels, à savoir blocs béton et blocs plastiques.

Les résultats ont été calculés en prenant notamment en compte les données suivantes :

- L'hypothèse faite dans cette étude est celle d'une substitution 50% à des blocs béton et 50% à des blocs plastiques.
- Les taux de substitution sont de :
 - o 1 kg de PUNR pour 2 kg de béton dans le cas où la solution substituée est celle des blocs béton
 - o 1 kg de PUNR pour 0.3 kg de polyéthylène dans le cas où la solution substituée est celle des blocs plastiques
- Les impacts de lixiviation, pris en compte pour la voie de valorisation, sont supposés négligeables pour les solutions traditionnelles.

Le bilan environnemental établi pour les indicateurs analysés montre l'existence de bénéfices environnementaux en faveur de la voie de valorisation, ceux-ci étant toutefois minimes pour plusieurs indicateurs.

Les bénéfices générés par la substitution des blocs béton ou plastique par les PUNR proviennent en majeure partie du fait qu'on évite la production de polyéthylène vierge. La solution à base de PUNR est également plus avantageuse que le béton pour tous les indicateurs étudiés.

Les résultats obtenus et synthétisés ci-dessus doivent être toutefois nuancés au vu des deux points suivants :

- l'importance en valeur des bénéfices apportés par la valorisation de PUNR dans les bassins de rétention dépend largement des proportions respectives de blocs béton et de blocs plastique dans la solution substituée, les blocs plastiques et les blocs béton engendrant des impacts sensiblement différents ;
- concernant la consommation énergétique, l'analyse de sensibilité réalisée montre que le bilan n'est plus favorable à la voie utilisant des PUNR lorsque 50% de l'énergie matière du pneu lui est imputée. Ceci s'explique par le caractère peu énergivore de la solution traditionnelle qui met en œuvre des matériaux à plus faible contenu énergétique (mix de solutions blocs béton et de solutions blocs plastiques).

Remarque : les impacts générés par la voie de valorisation proviennent essentiellement de l'étape de mise en œuvre, ceci s'explique notamment par le fait que l'indice de vide des PUNR (70%) est moins élevé que celui des blocs béton (100%), ce qui implique donc des efforts d'excavation supplémentaires.

Focus sur les bassins infiltrants

Indicateurs	Scénarios ¹	Bilan global	Impacts générés par la valorisation		Impacts évités (effet de substitution)
			Total	dont étapes de transport et de préparation	
Consommation d'énergie primaire totale (en GJ)		0 ^(*)	1	1	-1
Emissions de gaz à effet de serre d'origine fossile (direct, 100 ans) (en kg éq. CO ₂)		-11	57	57	-68
Emissions de gaz acidifiants (en g éq. SO ₂)		18 ^(*)	319	319	-301
Emissions de gaz contribuant à la création d'ozone troposphérique (en g éq. éthylène)		0 ^(*)	7	7	-7
Consommation de ressources non renouvelables (en kg éq. antimoine)		0	0,3	0,3	-0,3
Consommation d'eau (en m ³)		0	0,1	0,1	-0,1
Rejets contribuant à l'eutrophisation (en g éq. PO ₄)		21	75	71	-54
Production de déchets (en t)		0	0	0	0

¹Avertissement : les étapes identiques aux deux solutions comparées ne sont pas prises en compte dans la mesure où elles n'opèrent aucune différenciation sur le bilan environnemental

(*) Ecart non significatif car inférieur à 10% du total des impacts générés par la valorisation

Le bilan provient de la comparaison de la filière utilisant des PUNR broyés avec la solution utilisant des graves naturelles. La substitution est réalisée sur la base d'un ratio de 1 kg de PUNR pour 6 kg de graves.

Le bilan environnemental établi pour les indicateurs auxquels nous nous sommes intéressés montre l'existence de bénéfices environnementaux en faveur de la voie de valorisation, ceux-ci étant toutefois minimes.

Dans le cas particulier de l'indicateur « consommation d'énergie primaire », l'analyse de sensibilité réalisée sur l'énergie matière contenue dans les pneus montre que l'intérêt énergétique de la voie de valorisation PUNR en bassins infiltrants n'est pas aussi solidement acquis car il dépend du choix d'affectation de cette énergie.

Les bénéfices générés par la substitution des graves par les PUNR proviennent essentiellement du facteur de substitution. Les impacts évités correspondent pour l'essentiel à l'étape de production des graves, le fait d'éviter les étapes de transport pour l'approvisionnement en graves n'influe que très peu sur l'évitement obtenu.

3. Focus sur les voies destructives

Focus sur la cimenterie

Indicateurs	Scénarios ¹	Bilan global	Impacts générés par la valorisation		Impacts évités (effet de substitution)
			Total	<i>dont étapes de transport et de préparation</i>	
Consommation d'énergie primaire totale (en GJ)		-43	1	1	-44
Emissions de gaz à effet de serre d'origine fossile (direct, 100 ans) (en kg éq. CO ₂)		-1 466	1 888	95	-3 354
Emissions de gaz acidifiants (en g éq. SO ₂)		-7 031	630	630	-7 661
Emissions de gaz contribuant à la création d'ozone troposphérique (en g éq. éthylène)		-92	11	11	-103
Consommation de ressources non renouvelables (en kg éq. antimoine)		-21	0,5	0,5	-21,5
Consommation d'eau (en m ³)		-12	0,2	0,2	-12
Rejets contribuant à l'eutrophisation (en g éq. PO ₄)		-327	116	116	-443
Production de déchets (en t)		0	0	0	0

¹Avertissement : les étapes identiques aux deux solutions comparées ne sont pas prises en compte dans la mesure où elles n'opèrent aucune différenciation sur le bilan environnemental

Le bilan environnemental est établi à partir de la comparaison entre la valorisation énergétique de PUNR en cimenterie et des solutions faisant appel à des combustibles traditionnels, à savoir du coke de pétrole et du charbon.

Pour une bonne interprétation des résultats, les points méthodologiques suivants sont à considérer :

- La substitution se fait à contenu énergétique équivalent
- Les PUNR se substituent à un mix composé à 75% de coke et 25% de charbon
- les seules émissions pour lesquelles ont été calculées un différentiel sont les émissions de CO₂ ; les autres émissions sont supposées équivalentes pour la solution utilisant des PUNR et la solution substituée, et ne sont donc pas prises en compte dans le bilan.

Le bilan environnemental établi pour les indicateurs étudiés montre l'existence de bénéfices environnementaux significatifs en faveur de la voie de valorisation. Le contenu biomasse des PUNR et l'absence de processus d'extraction impactant (cas des combustibles traditionnels) sont à l'origine des gains environnementaux calculés.

Dans le cas particulier de l'indicateur de consommation d'énergie primaire totale, l'analyse de sensibilité réalisée montre que le bilan environnemental reste favorable à la filière utilisant des PUNR lorsque 50% de l'énergie matière contenue dans les pneus lui est imputée.

Une partie des émissions des PUNR provient de carbone biomasse³, ce dernier ne contribuant pas à l'indicateur d'effet de serre. Cette règle est cohérente avec les dispositions

³ Utilisation des pneus usagés comme combustible alternatif, Valeurs de référence et protocoles de caractérisation, Aliapur & PricewaterhouseCoopers, Juin 2009

prévues par la réglementation relative à la quantification des émissions de CO₂ déclarées dans le cadre du système d'échange de quotas d'émission de gaz à effet de serre⁴.

Ainsi le facteur d'émission pris en compte pour les PUNR est d'environ 60 t CO₂/TJ contre plus de 90 t CO₂/TJ pour le charbon ou le coke de pétrole⁵.

⁴ Arrêté du 31 mars 2008 relatif à la vérification et à la quantification des émissions déclarées dans le cadre du système d'échange de quotas d'émission de gaz à effet de serre

⁵ A noter que dans le cadre du Plan National d'Allocation des Quotas pour la période 2008 – 2012, le Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de la Mer a émis le 10 décembre 2009 une mise à jour de la dérogation nationale pour la détermination de la part biomasse dans les PUNR

Focus sur la chaufferie urbaine

Indicateurs	Scénarios ¹	Bilan global	Impacts générés par la valorisation		Impacts évités (scénario principal substitué)
			Total	dont étapes de transport et de préparation	
Consommation d'énergie primaire totale (en GJ)		-33 - 31 ²	1	1	-34
Emissions de gaz à effet de serre d'origine fossile (direct, 100 ans) (en kg éq. CO ₂)		-1 275 - 323 ²	1 875	82	-3 150
Emissions de gaz acidifiants (en g éq. SO ₂)		-1 499 - 555 ²	466	466	-1 965
Emissions de gaz contribuant à la création d'ozone troposphérique (en g éq. éthylène)		1 ^(*) - 270 ²	10	10	-9
Consommation de ressources non renouvelables (en kg éq. antimoine)		-17	0,5	0,5	-17,5
Consommation d'eau (en m ³)		0	0,2	0,2	0
Rejets contribuant à l'eutrophisation (en g éq. PO ₄)		-27	107	107	-134
Production de déchets (en t)		-1	0	0	-1

¹Avertissement : les étapes identiques aux deux solutions comparées ne sont pas prises en compte dans la mesure où elles n'opèrent aucune différenciation sur le bilan environnemental

² Bilan global calculé avec un scénario composé à 66% de gaz naturel, 18% de fuel et 16% de charbon

(*) Ecart non significatif car inférieur à 10% du total des impacts générés par la valorisation

Le bilan environnemental est établi par comparaison entre l'utilisation à des fins énergétiques de PUNR en chaufferie urbaine et des solutions faisant appel à des combustibles traditionnels, à savoir du charbon dans le scénario principal, et un bouquet énergétique de gaz naturel, de fuel, et de charbon dans le cadre de l'analyse de sensibilité.

Pour une bonne interprétation des résultats, les points méthodologiques suivants sont à considérer :

- La substitution se fait à contenu énergétique équivalent
- Le scénario principal d'évitement repose sur une solution traditionnelle composée à 100% de charbon
- Dans un second temps, une analyse de sensibilité a été réalisée sur la base d'un mix composé de 66% de gaz naturel, 18% de fuel et 16% de charbon (bouquet énergétique représentatif des combustibles traditionnels utilisés en France)

Pour l'ensemble des indicateurs auxquels nous nous sommes intéressés à l'exception des émissions de gaz contribuant à la création d'ozone troposphérique, le bilan environnemental établi se traduit par des bénéfices environnementaux, ceux-ci étant toutefois plus ou moins marqués selon l'indicateur considéré.

Pour l'indicateur de consommation d'énergie primaire totale, l'analyse de sensibilité réalisée montre que le bilan environnemental reste favorable à la filière utilisant des PUNR lorsque 50% de l'énergie matière contenue dans les pneus lui est imputée.

Les gains environnementaux calculés proviennent essentiellement du contenu biomasse des PUNR et de l'absence de processus d'extraction impactant (contrairement aux combustibles traditionnels comme le charbon auxquels les PUNR se substituent).

Lorsque la voie traditionnelle est modélisée par un bouquet énergétique représentatif des combustibles traditionnels utilisés en France, les gains apportés par la solution utilisant des PUNR diminuent sensiblement pour les émissions de gaz à effet de serre et de gaz acidifiants. Ceci est essentiellement dû à la prédominance du gaz naturel dans le mix énergétique substitué, les émissions de combustion du gaz naturel en chaufferie urbaine étant d'un ordre de grandeur proche de celui des pneus (60 t CO₂/TJ).

Focus sur l'aciérie

Indicateurs	Scénarios ¹	Bilan global	Impacts générés par la valorisation		Impacts évités (effet de substitution)
			Total	dont étapes de transport et de préparation	
Consommation d'énergie primaire totale (en GJ)		-54	1	1	-55
Emissions de gaz à effet de serre d'origine fossile (direct, 100 ans) (en kg éq. CO ₂)		-672	1735	79	-2407
Emissions de gaz acidifiants (en g éq. SO ₂)		-2033	453	452	-2486
Emissions de gaz contribuant à la création d'ozone troposphérique (en g éq. éthylène)		-193	10	10	-203
Consommation de ressources non renouvelables (en kg éq. antimoine)		-26	0,5	0,5	-26,5
Consommation d'eau (en m ³)		-2	0,2	0,2	-2
Rejets contribuant à l'eutrophisation (en g éq. PO ₄)		-77	104	104	-181
Production de déchets (en t)		-1	0	0	-1

¹Avertissement : les étapes identiques aux deux solutions comparées ne sont pas prises en compte dans la mesure où elles n'opèrent aucune différenciation sur le bilan environnemental

Le bilan environnemental de la valorisation des broyats de PUNR en aciérie est établi à partir d'une comparaison avec la solution traditionnelle d'utilisation d'antracite pour le même service rendu. Cette voie est une voie de valorisation destructive du PUNR. Il a été considéré qu' 1.7 kg de PUNR se substituent à 1 kg d'antracite et 0.26 kg de ferraille.

Tout ce qui est commun aux deux solutions n'a pas été pris en compte dans l'évaluation. Ainsi, seules les émissions de CO₂ ont été considérées comme différentielles entre l'utilisation des PUNR et la solution traditionnelle.

Pour l'ensemble des indicateurs analysés, le bilan global montre l'existence de bénéfices environnementaux, ceux-ci étant plus ou moins marqués selon les indicateurs considérés.

A l'exception des émissions de gaz à effet de serre, les bénéfices générés par la substitution de l'antracite par les PUNR proviennent en majeure partie du fait qu'on évite la production d'antracite et le recyclage de ferrailles qui constituent des étapes relativement polluantes ; le fait d'éviter les étapes de transport pour l'approvisionnement en antracite apporte également quelques bénéfices supplémentaires.

Pour l'indicateur de consommation d'énergie primaire totale, l'analyse de sensibilité réalisée montre que le bilan environnemental reste favorable à la filière utilisant des PUNR lorsque 50% de l'énergie matière contenue dans les pneus lui est imputée.

Pour les émissions de gaz à effet de serre, le bilan est en faveur de la voie de valorisation des PUNR, le gain étant toutefois moins importante que dans le cas de la cimenterie. Bien qu'il y ait une part de carbone biomasse dans les PUNR, le facteur de substitution joue plutôt en faveur de l'antracite que des PUNR.

Focus sur la fonderie

Indicateurs	Scénarios ¹	Bilan global	Impacts générés par la valorisation		Impacts évités (effet de substitution)
			Total	dont étapes de transport et de préparation	
Consommation d'énergie primaire totale (en GJ)		-29^(*)	2 191	1	-2 221
Emissions de gaz à effet de serre d'origine fossile (direct, 100 ans) (en kg éq. CO ₂)		-1 193^(*)	40 290	79	-41 483
Emissions de gaz acidifiants (en g éq. SO ₂)		-4 115^(*)	433 169	452	-437 284
Emissions de gaz contribuant à la création d'ozone troposphérique (en g éq. éthylène)		-301^(*)	76 725	10	-77 026
Consommation de ressources non renouvelables (en kg éq. antimoine)		-20^(*)	1 139	0,5	-1 159
Consommation d'eau (en m ³)		-6^(*)	1 310	0,2	-1 316
Rejets contribuant à l'eutrophisation (en g éq. PO ₄)		-234^(*)	35 801	104	-36 035
Production de déchets (en t)		-1^(*)	166	0	-167

¹Avertissement : les étapes identiques aux deux solutions comparées ne sont pas prises en compte dans la mesure où elles n'opèrent aucune différenciation sur le bilan environnemental

(*) Ecart non significatif car inférieur à 10% du total des impacts évités

Les résultats ci-dessus proviennent de la comparaison de l'utilisation de broyats de PUNR en fonderie à l'utilisation de coke de fonderie pour le même service rendu. Cette voie est une voie de valorisation destructive du PUNR, la durée de vie n'intervient donc pas dans le bilan de la substitution.

La valorisation en fonderie est une filière émergente, les données utilisées pour la présente étude sont issues de résultats d'essais industriels qui mériteraient d'être confirmés.

L'utilisation de PUNR en fonderie permet d'une part d'apporter du carbone en substitution du carbone traditionnellement apporté par le coke et d'autre part d'apporter de l'acier à la charge servant à produire la fonte.

L'introduction de PUNR dans la charge en lieu et place d'une partie du coke, modifie le taux de carburation du coke (c'est-à-dire le ratio entre la quantité de carbone intégrée à la fonte en sortie de cubilot et la quantité de carbone initialement contenue dans le coke) par rapport à son taux de carburation en l'absence de PUNR. Le taux de carburation du coke en l'absence de PUNR est de 1,17 % ; il est de 0,94 % lorsque la quantité de PUNR introduite correspond à 1 % de la charge (ferrailles + coke + PUNR). Ces pourcentages quoique faibles ont une influence importante sur le procédé de fabrication de la fonte.

Du fait de l'influence de la présence de PUNR sur le comportement du coke dans le cubilot, il ne peut pas simplement être considéré que les PUNR se substituent en partie à du coke et en partie à des ferrailles. Il a donc été considéré qu'une charge composée de 1000 kg de ferrailles, de 95 kg de coke et de 10 kg de PUNR se substituait à une charge composée de 1002,35 kg de ferrailles et de 100,5 kg de coke.

Sur la base des données actuellement disponibles, il ressort des différents calculs que les écarts mis en évidence ne sont pas significatifs, ceci quel que soit l'indicateur analysé.

SECTION VI – Bibliographie

ADEME / CTIF (Centre Technique des Industries de la Fonderie) ; « Introduction de pneumatiques dans les cubilots » ; Octobre 2005

ADEME ; Guide des facteurs d'émissions - version 5.0 ; Janvier 2007

ADEME ; Version 6 du Bilan CarboneTM ; 2009

AFNOR ; Norme NF P 01-010 – « Qualité environnementale des produits de construction - Déclaration environnementale et sanitaire des produits de construction » ; 2004

ALIAPUR / FMGC / CTIF / ADEME ; « Validation Industrielle de l'utilisation de broyats de PUNR comme matière première dans le cubilot d'une fonderie » ; Mai 2008

ALIAPUR / PricewaterhouseCoopers ; « Utilisation des pneus usagés comme combustible alternatif, Valeurs de référence et protocoles de caractérisation » ; Juin 2009

ALIAPUR / FieldTurf Tarkett / ADEME / EEDEMS : « Evaluation environnementale et sanitaire de l'utilisation de granulats d'élastomères (vierges et issus de pneumatiques usagés) comme remplissage de gazons synthétiques de troisième génération » ; 2006

APUR (Atelier Parisien d'Urbanisme) ; « Les réseaux de chaleur à Paris et en petite couronne » ; Novembre 2006

Association française de promotion des réseaux de chaleur et de froid ; « Données énergétiques pour les réseaux de chaleur en France » ; 2009

ATILH ; Approvisionnement moyen en combustibles traditionnels ; 2009

ATILH ; Mix moyen des combustibles meubles utilisés en cimenterie en France ; 2008

BP ; « BP Statistical review of world energy » ; Juin 2007

Cabinet Pierre Robin / BIO IS / ADEME/ Ville de Paris / Conseil Régional Rhône Alpes / Eurofield ; « Analyse de cycle de vie comparative d'un terrain de football en gazon naturel ou gazon synthétique » ; Novembre 2008

CSTB / ADEME / ALIAPUR / Sportingsols / Centre équestre de Vallet ; « Valorisation des pneumatiques usages dans la conception de nouveaux sols équestres » ; 2007

Eco-Emballages ; base de données WISARDTM

Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne ; « Conception d'un système de stockage des eaux pluviales » ; Etudiants : Loïc Decrey, Guillaume Grandchamp, encadrant EPFL : Jérôme Payet, encadrant externe : Gilles Vialatte (Groupe Brunet) ; 2008

EEDEMS (Evaluation Environnementale Déchets, Matériaux, Sols pollués) ; « Caractéristiques et propriétés techniques des pneumatiques usagés dans le cadre d'utilisations en génie civil » ; 2005

World Energy Council ; « Survey of Energy resources 2007 » ; Septembre 2007

Autres sources bibliographiques utilisées pour la modélisation des voies traditionnelles

Thème	Etape	Source
Production d'électricité Européenne, Française	Energie	Electricity Information 2007, IEA Statistics, International Energy Agency Pour les procédés de combustion: Laboratium fur Energiesysteme, ETH, 1996
Transport par route	Transport	Laboratorium fur Energiesysteme ETH, Zurich, 1996
Transport par mer	Transport	Laboratorium fur Energiesysteme ETH, Zurich, 1996
Production d'azote liquide	Granulation	Données Ecoinvent Swiss Centre for LCI, EMPA-DU
Production de ciment	Bassin de rétention	Laboratorium fur Energiesysteme ETH, Zurich, 1996
Production de polyéthylène (HDPE)	Bassin de rétention	APME, 2005
Production de fibre de verre	Bassin de rétention	Données d'un site confidentiel
Production de gravier	Bassin infiltrant	Laboratorium fur Energiesysteme ETH, Zurich, 1996
Production et combustion du diesel	Chaufferie Urbaine	Laboratorium fur Energiesysteme ETH, Zurich, 1996
Production et combustion du bois	Chaufferie Urbaine	Swiss Federal Office of Environment , Forest and Landscape (FOEL or BUWAL)
Production et combustion du Gaz Naturel	Chaufferie Urbaine Gazon Synthétique	Laboratorium fur Energiesysteme ETH, Zurich, 1996
Production du noir de carbone	Aciérie	ETH (Ökoinventare für Energiesysteme)
Production du coke	Fonderie	Données d'un site (confidentiel)
Production de Polyuréthane	Objet Moulé Sol Equestre Gazon Synthétique	APME, 1999
Production d'Ethylène Propylène Diène (EPDM)	Gazon Synthétique	Source confidentielle (moyenne des sites américains 1990)
Production de sable	Gazon Synthétique Sol Equestre	Données d'un site français
Production Styrene Butadiène – Latex	Gazon Synthétique	IFP, Caoutchoucs synthétiques, procédés et données économiques.
Production Polypropylène	Gazon Synthétique	APME, 1999
Production Polyéthylène (LDPE)	Gazon Synthétique	APME, 2005
Production de Polyéthylène Téréphtalate	Gazon Synthétique	APME, 2005
GPL : Production et Combustion	Gazon Synthétique	Danish Environmental Protection Agency, 1998

Thème	Etape	Source
Décharge Déchets Classe 2	Gazon Synthétique Sol Equestres	Ecobilan
Production de Craie	Gazon Synthétique	Swiss Federal Office of Environment, Forests and Landscape (FOEFL or BUWAL)
Production de ferraille	Fonderie Aciérie Cimenterie	International Iron and Steel Institute - 2005

