

**Evaluation de différentes voies de valorisation des  
Pneumatiques Usagés Non Réutilisables**

Une utilisation pratique du modèle négaWatt / négaMat

**RAPPORT FINAL**

Pour :



COLLECTE ET RECYCLAGE DE VOS PNEUS

71 cours Albert Thomas, 69003 Lyon

Thierry Hanau / Adrien Jacob  
15/03/2024

## Table des matières

Résumé exécutif	3
1. Contexte et objectifs	3
1.1. Les organismes intervenants	3
1.2. Objectifs de l'étude	3
2. La lutte contre le changement climatique et le scénario négaWatt	3
2.1. La lutte contre le changement climatique	3
2.2. Le scénario négaWatt	4
Démarche globale du scénario	4
La demande	5
La production	5
Méthodologie et hypothèses générales	6
Calcul des impacts matières	6
La démarche négaMat renforce l'aspect systémique du scénario	6
3. L'évolution des ressources en pneus usagés	8
3.1. Modélisation des transports de voyageurs et des marchandises	8
La nécessaire et souhaitable réduction des déplacements	8
Report modal et covoiturage permettent une baisse du trafic routier	8
L'évolution du transport de marchandises	9
3.2. Evolution de la ressource en pneumatiques usagés	10
4. Données de base de l'étude	11
4.1. Débouchés de la filière de recyclage pour l'année de référence	11
4.2. Composition des pneumatiques	12
4.3. Facteurs d'émission et pouvoir calorifique des pneumatiques usagés	13
4.4. Les facteurs d'émissions des combustibles	13
5. Evolution des débouchés de la filière du recyclage	14
5.1. Evolution de l'utilisation comme combustibles pour la production de ciment	14
5.2. Evolution du débouché dans les aciéries électriques.	15
5.3. Autres débouchés	16
6. Comparaison des différentes voies de valorisations en termes d'émissions de gaz à effet de serre et de consommation énergétique	18
6.1. Secteur modélisés	18
6.2. Principe de calcul des émissions des gaz à effet de serre pour une étape de transformation	20
6.3. Les scénarios de valorisation étudiés	20
Scénario « baseline » et « sans valorisation »	21
Scénario « 100% ciment »	22
Scénario « 100% acier »	22

Scénario « 100% noir de carbone » (pyrolyse).....	23
Scénario « 100 % objet moulés » .....	24
Scénario « 100% pyrogazéification électrique ».....	25
6.4. Comparaison des différentes voies de valorisation	26
6.5. Limites de l'étude	27
Conclusion	28
Bibliographie	29
Liste des figures	29
Liste des tableaux	29

## Résumé exécutif

Aliapur est l'organisme qui gère la filière de collecte et de valorisation des pneus usagés en France. L'institut négaWatt a étudié l'impact de l'activité d'Aliapur sur la consommation énergétique et les émissions de gaz à effet de serre de la France, en comparant les différentes voies de valorisation de pneus usagés existantes ou en cours de développement (récupération du noir de carbone par pyrolyse, pyrogazéification). Cette étude définit un ordre de mérite de ces différentes voies et propose des arbitrages entre elles.

### **L'évolution des ressources en pneus usagés**

Selon les hypothèses du scénario négaWatt, le besoin en mobilité routière baisse en 2050 de 37% pour le transport de personnes et de 20% pour le fret routier (par rapport à 2015). Cela conduit à une réduction de la ressource en PUNR de 40%, du fait d'hypothèses d'augmentation du taux d'occupation et d'une modération de la taille des véhicules.

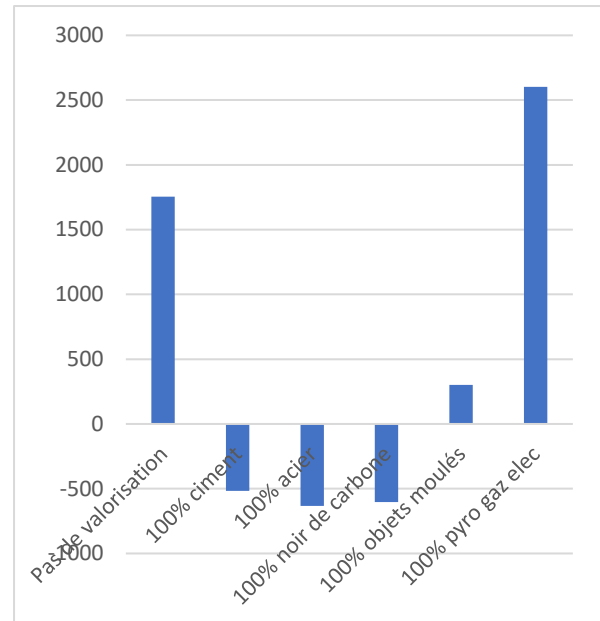
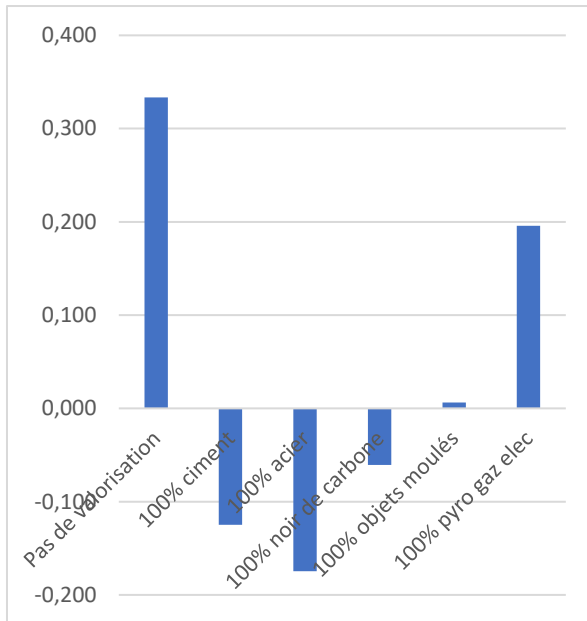
### **Comparaison des voies de valorisation**

Les différentes voies de valorisation identifiées pour les PUNR ont été comparées par une analyse multicritères. Les 4 critères retenus sont la taille du débouché possible, la réduction des émissions de Gaz à Effet de Serre de la France permise par la valorisation des PUNR en année de référence (2014), la réduction de la consommation énergétique de la France en 2050<sup>1</sup>, et la faisabilité technique de la voie de valorisation. Les écarts par rapport à la situation de valorisation en 2014 ont été calculés grâce au modèle négaMat. A cette date, nous avons considéré la quantité de pneus valorisés en France et non réutilisés (occasion, rechapage), soit 232 kt.

Les graphiques suivants illustrent ces écarts pour les différents scénarios/filières de valorisation en termes d'émission, puis de consommation d'énergie.

---

<sup>1</sup> L'année 2014 a été choisie d'après les données d'intensité énergétique détaillées à notre disposition, pour l'industrie Française. Par ailleurs, dans une perspective de décarbonation des différents vecteurs énergétiques, nous avons examiné les enjeux GES court terme vis-à-vis du contexte actuel, et les enjeux à plus long terme (2050) sous le prisme de la consommation d'énergie, qui restera un enjeu, indépendamment des problématiques d'atténuation.



Ecart d'émissions de GES au scénario « baseline » en année de référence (MtCO<sub>2</sub>e)

Ecart de consommation d'énergie au scénario « baseline » en 2050 (GWh)

Note sur le remblai : un scénario « 100% remblai » serait équivalent au scénario « sans valorisation »

### Valorisation dans le processus de fabrication du ciment

Le gain en émission de GES dans les conditions 2014 sont d'environ 120 kt CO<sub>2</sub>e et le gain en consommation énergétique d'environ 500 GWh, dans les 2 cas cette voie est la seconde mieux placée.

Le débouché « cimenterie » est pérenne et peut absorber 100% des PUNR. La production de ciment évolue de 16,3 Mt à 8,68Mt en 2050. Malgré cette diminution, le besoin en combustible [7491 GWh] est supérieur à la ressource en PUNR, et le pourcentage de cendre (27% soit environ 80 kt) étant très inférieur aux charges du ciment (2,8Mt).

La faisabilité technique est prouvée de longue date.

### Valorisation dans le processus de fabrication d'acier

Cette voie apparait comme la plus favorable. En effet si 100% des PUNR étaient destinés a la fabrication d'acier, le gain en émission de GES serait d'environ 174 ktCO<sub>2</sub>e et le gain en consommation énergétique d'environ 630 GWh, par rapport a la situation 2014.

Le besoin en combustible de l'aciérie électrique permettrait d'absorber dès à présent environ 100 kt de PUNR, chiffre qui doublerait avec le déploiement de la filière EAF tel qu'envisagé dans le scénario négaWatt<sup>2</sup>. Cela représenterait alors 72% du gisement total de PUNR en 2050.

<sup>2</sup> En 2050, le scénario négaWatt postule une production d'acier de 11,3 Mt d'acier 100% issu de la filière arc électrique (EAF), dont 4,1 Mt produit par le procédé de réduction directe à l'hydrogène, le reste provenant de ferrailles recyclées.

### **Valorisation dans le processus de pyrolyse**

Le recyclage intégral des PUNR comme intrant du process de pyrolyse permettrait un gain de 60 kt des émissions de GES et une réduction de 600 GWh de la consommation énergétique. Cette voie est ainsi la troisième en ordre de mérite.

Il est plus difficile d'estimer les débouchés et la faisabilité technique pour cette hypothèse. Le produit solide de la pyrolyse étant un agrégat de particules de noir de carbone et d'autres cendres, la possibilité d'intégrer un fort pourcentage de ce compound dans les pneumatiques semble être une hypothèse forte, compte tenu des contraintes de conception portant sur les pneumatiques.

### **Valorisation dans le processus de fabrication d'objets moulés**

Cette voie apparait comme la quatrième dans l'ordre de mérite. Le modèle négaMat ne montre pas de gain en termes d'émissions de gaz à effet de serre et un gain de consommation de 300 GWh. Ces résultats sont à prendre avec précaution, il est en effet beaucoup plus difficile de modéliser le secteur de la pétrochimie et de la chimie organique, que celui de la chimie minérale, et les gains sont sans doute sous-estimés.

Les objets moulés peuvent être considérés comme des débouchés pérennes. Ces derniers ne sont pas tous calculables directement par le modèle négaMat car beaucoup de cas d'application sont possible. Mais nous avons estimé par exemple un ordre de grandeur du potentiel de consommation de PUNR comme semelle sous traverse de chemin de fer, de l'ordre de 150 kt.

Il s'agit néanmoins d'un débouché encore peu développé à l'heure actuelle. En terme de faisabilité technique, la difficulté de cette voie de valorisation repose essentiellement dans la capacité de la filière à fournir un produit de caractéristiques physicochimiques à la fois favorables et stables dans le temps, pour permettre sa prise en compte par les concepteurs d'objets moulés.

### **Valorisation dans le processus de fabrication de bitume**

Le débouché « bitume » devient négligeable. En effet, si l'entretien du réseau routier rend nécessaire la consommation de bitume, celui-ci est considéré comme presque entièrement recyclé dans le scénario négaWatt.

### **Valorisation pour travaux publics et génie civil**

L'utilisation intégrale de PUNR comme remblai ou pour les bassins d'infiltration conduirait à une augmentation de 330 kt des émissions de GES et de 1750 GWh de consommation énergétique.

Les utilisations de PUNR comme remblais ne sont pas modélisées spécifiquement dans le scénario négaWatt, mais la quantité d'ouvrages ne baissant que de 30%, ce débouché reste significatif.

Nous considérons que cette voie de valorisation devrait être diminuée.

### **Valorisation par pyrogazéification électrique**

Cette filière de valorisation présente un impact négatif de 196 ktCO<sub>2</sub>e d'augmentation des émissions sur le bilan GES du système, et 2600 GWh de consommation énergétique, du fait de pertes de

rendements importantes (l'intérêt de la technologie résidant en partie dans le stockage d'électricité excédentaire, au prix d'une perte de transformation).

Par ailleurs, la voie « 100 % pyrogazéification WGS » n'est pas représentée car plus défavorable encore, compte tenu de facteurs d'émissions plus élevés.

## Synthèse

	Pérennité du débouché	Taille du marché	Réduction GES	Intérêt énergétique	Faisabilité technico économique
<b>100 % ciment</b>	Pérenne	Supérieur à la ressource	Elevée	Elevé	Prouvé
<b>100 % acier</b>	Pérenne	Légèrement inférieur à la ressource	Elevée	Elevé	Prouvé sur EAF classique / A étudier sur EAF H2
<b>100% objets moulés</b>	Pérenne	Moyen à élevé	Neutre à négatif*	Neutre à négatif*	A prouver par application (impact R&D)
<b>Pyrolyse / recyclage du noir de carbone</b>	Pérenne	Moyen	Moyen	Elevé	A prouver (limitations possibles sur le design des pneumatiques)
<b>Pyrogazéification</b>	Pérenne	Elevé	Négatif	Négatif	Pilote industriel / coûts élevés
<b>Bitume</b>	Non pérenne	En décroissance	NC	NC	Limité à des usages spécifiques
<b>Remblai</b>	Pérenne	Supérieur à la ressource	Négatif	Négatif	Prouvé

On peut ainsi séparer les voies de valorisation de la façon suivante :

- La voie acier est à développer
- La voie ciment est à conserver
- Les voies pyrogazéification et bitume sont à abandonner
- Les voies d'usage en remblai sont également à abandonner
- La voie pyrolyse apparait comme moins intéressante à court terme mais compte tenu des limitations exposées et de son intérêt énergétique à long terme, nécessite des investigations complémentaires
- Enfin la voie objets moulés apparait comme moins intéressante à développer mais compte tenu de limitations du modèle, mérite des investigations complémentaires

## Limites de l'étude

Les principales limitations de l'étude concernent les filières « objets moulés » et « pyrolyse ».

Concernant la filière « objets moulés », les données négaWatt sont précises concernant la fabrication du butylène et la transformation du caoutchouc, mais les précurseurs du butylène sont mal estimés. De façon générale, le secteur de la synthèse chimique est mal couvert par le modèle négaMat à ce jour. Il se peut donc que les gains liés au débouché objets moulés soit sous-estimés.

De la même façon, les données d'intensité énergétique et émission concernant le processus de pyrolyse utilisées dans notre modèle sont incertaines. Par ailleurs la possibilité de réutiliser l'intégralité du noir de carbone dans la fabrication des pneus est à revalider.

# 1. Contexte et objectifs

## 1.1. Les organismes intervenants

**Aliapur** est l'organisme en charge de gérer la filière de recyclage des pneumatiques usagés, en particulier la collecte des pneumatiques, leur recyclage et notamment la fabrication des sous-produits, leur commercialisation ainsi que la recherche et développement relative au process de recyclage.

**L'Institut négaWatt** est une entreprise conseil en transition au service des territoires et des entreprises. L'institut s'appuie sur les méthodes et outils développées par l'association négaWatt, notamment le scénario de prospective négaWatt. [1] Ce scénario décrit un chemin vers la « neutralité carbone » de la France.

## 1.2. Objectifs de l'étude

L'objectif de cette étude menée par l'Institut négaWatt est d'accompagner Aliapur dans l'analyse des impacts possibles de la transition énergétique sur l'activité d'Aliapur et dans la définition d'une feuille de route compatible avec les objectifs de lutte contre le changement climatique.

L'étude quantifie les impacts sur les activités d'Aliapur liés à la transition énergétique, qui incluent évolutions potentielles de la ressource en pneus usagés et des débouchés. Ces impacts peuvent être des menaces ou des opportunités.

Au-delà de ces impacts exogènes, la filière de recyclage peut se positionner de façon active : son activité de recyclage actuelle contribue en effet à diminuer les émissions de gaz à effet de serre de la France. L'étude estime l'impact sur la consommation énergétique et les émissions de gaz à effet de serre de la France des différentes voies de valorisation de pneus usagés existantes ou en cours de développement (récupération du noir de carbone par pyrolyse, pyrogazéification). Elle définit un ordre de mérite de ces différentes voies et propose des arbitrages entre elles.

# 2. La lutte contre le changement climatique et le scénario négaWatt

## 2.1. La lutte contre le changement climatique

La limitation du réchauffement climatique d'origine anthropique à 1,5 °C requiert d'atteindre des émissions nettes des émissions de gaz à effet de serre nulles en 2050, c'est à dire une situation où les émissions d'origine anthropiques sont égales au stockage du carbone dans les écosystèmes, voire inférieures. [2] On appelle cette situation la « neutralité carbone ». <sup>3</sup>

---

<sup>3</sup>

En %

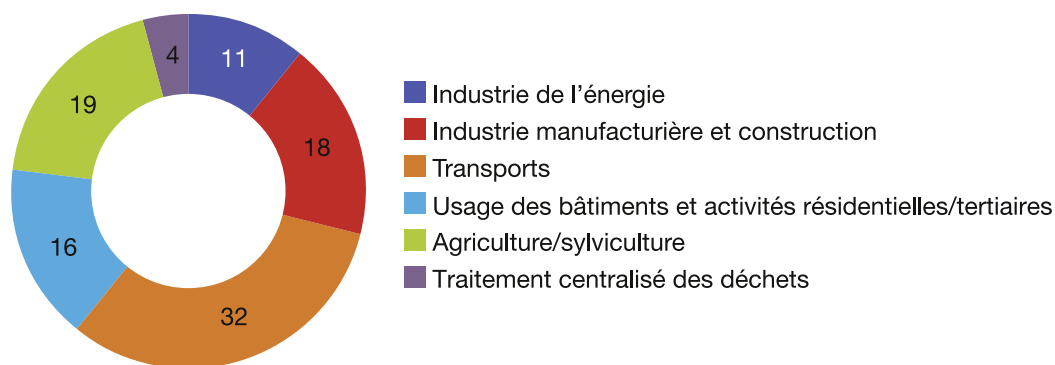


Figure 1 Répartition sectorielle des émissions de GES en France en 2022 (estimation provisoire). Source : Citepa, 2023 (format SECTEN)

Les émissions de gaz à effet de serre sont très majoritairement dues à la combustion d'énergies fossiles pour produire de l'électricité, faire rouler des véhicules, chauffer des bâtiments ou encore faire fonctionner des industries.

Les émissions du secteur agricole sont dues en grande partie aux méthane émis par le cheptel bovin et peuvent être équilibrées par le stockage naturel. La neutralité carbone de la France peut être atteinte par des émissions de gaz à effet de serre quasi nulle en 2050. Le scénario négaWatt décrit un chemin vers cette situation de neutralité carbone pour la France.

## 2.2. Le scénario négaWatt

Le premier scénario négaWatt [1] a été élaboré en 2003, et a été réactualisé en 2006, 2011, 2017 et 2022. Ce scénario énergétique est un exercice prospectif : le futur qu'il explore ne constitue en rien une prédiction mais représente un chemin possible et décrit les solutions pour l'atteindre

### Démarche globale du scénario

Ce scénario se fonde sur plusieurs modèles interfacés qui permettent de décrire le fonctionnement du système énergétique et de calculer les émissions de gaz à effet de serre des différents secteurs économiques contribuant aux émissions de gaz à effet de serre en France. La démarche conduit à intégrer en priorité des paramètres physiques et les flux en lien avec les différents usages de l'énergie. Depuis la dernière édition du scénario, un effort particulier a été porté sur les matériaux nécessaires à nos biens de consommation (via la constitution d'une grande matrice des flux matière) afin que l'empreinte environnementale de toutes nos activités soit la plus minime possible. L'objectif étant que celle-ci ne dépasse pas le volume des ressources disponibles au prorata du poids démographique de la France dans le monde. Ce modèle permet de quantifier les impacts de différents leviers activables qui sont de trois ordres : la sobriété (qui est un changement de la structure de la demande), l'efficacité énergétique et le développement d'énergies renouvelables.

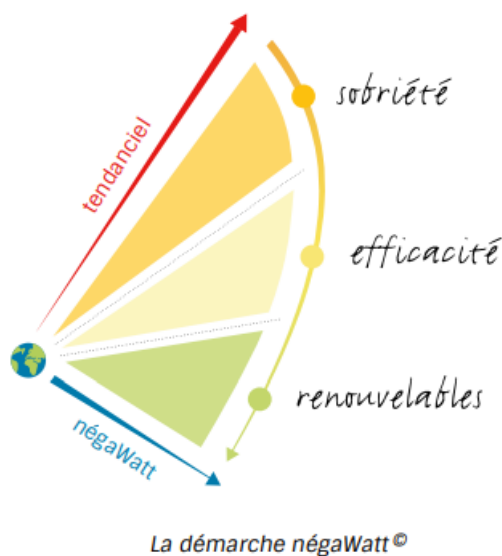


Figure 2: la démarche négaWatt

Source : scénario négaWatt [1]

### La demande

Sur la base des flux physiques d'énergies et de matières à l'échelle nationale, le scénario définit tout d'abord une évolution de la demande entre 2020 et 2050. Les hypothèses de changement sont élaborées au niveau des consommations d'énergie finale et de l'usage des biens de consommation. En partant ainsi des besoins de la vie courante, le scénario inverse la logique auparavant prédominante d'autres approches prospectives qui ne proposent qu'une modification de l'offre. La demande examinée dans le scénario négaWatt est en premier lieu celle des consommateurs finaux : besoins en chauffage, en construction, en déplacement, en alimentation, en biens d'équipements et produits de la vie courante, etc. Ces besoins, pour être satisfaits, induisent eux-mêmes une demande d'énergie, de matériaux, soit directement (l'électricité pour l'éclairage par exemple) soit indirectement (pour une ampoule LED, il faut du métal, du plastique, du verre, des composants électroniques). Pour les biens de consommation issus de l'industrie, la production de matériaux transformés induit une demande en matériaux de base qui eux-mêmes exigent une demande en matières premières (extraites et recyclées).

### La production

Une fois les besoins étudiés dans l'ensemble des secteurs de l'économie française (résidentiel, tertiaire, transports, industrie, agriculture), le scénario négaWatt remonte la chaîne de production afin d'identifier et quantifier les ressources mobilisables pour satisfaire la demande. Tant en énergies qu'en matériaux, la priorité est donnée aux sources dont les flux sont renouvelés constamment chaque jour par la nature : le soleil, le vent, la biomasse végétale et dans une moindre mesure l'eau et les sols. Le recours à des sources d'énergie et à des matières présentes dans le sous-sol est limité autant que possible, à l'exclusion de la géothermie. L'arrêt de l'utilisation des produits pétroliers, du charbon et de l'uranium à des fins énergétiques clôt l'ère extractive. D'ici à 2050, les énergies renouvelables et les matériaux biosourcés / recyclés prennent le dessus. Là où on ne sait pas encore les remplacer, seuls quelques usages marginaux de ressources fossiles sont maintenus, notamment pour l'industrie chimique. Le dimensionnement des outils de production se fait au regard de l'état actuel de chaque filière et de son potentiel de développement futur. Le scénario négaWatt arrive ainsi à un taux global de 94% de sources renouvelables pour l'énergie et les matières premières.

## Méthodologie et hypothèses générales

Côté consommation, ces évolutions sont qualifiées et quantifiées par usage, par « sous-usage » et même par « sous-sous-usage » lorsque c'est possible : par exemple la consommation d'électricité hors chauffage dans le secteur résidentiel (sous-usage de l'usage « électricité spécifique ») est évaluée à partir d'une décomposition en sept usages de base (éclairage, lavage, froid, cuisson, loisirs, gestion/hygiène et veilles) qui regroupent une vingtaine d'appareils différents (lave-linge, lave-vaisselle, ordinateurs, aspirateurs, luminaires, etc.). Une catégorie non définie intitulée « nouveaux usages » laisse la place à de possibles évolutions aujourd'hui impossibles à qualifier et a fortiori à quantifier. Le chiffrage année par année de ces évolutions est réalisé à dire d'experts sur la base d'une généralisation progressive des meilleures technologies disponibles aujourd'hui et des meilleures pratiques. Pour cela, il est tenu compte à la fois des opportunités existantes ou envisageables et des contraintes prévisibles. Par exemple : on peut envisager la mise en place d'une mesure incitative au remplacement d'un équipement mais elle va être contrainte par la durée de vie de ces produits. Ou on peut prévoir une obligation de rénovation des logements ce qui suppose le besoin de formation dans le secteur du bâtiment. On décrit ainsi une trajectoire de la baisse des consommations la plus rapide, la plus cohérente avec les Objectifs de développement durable mais aussi la plus réaliste possible. La même démarche est adoptée pour la production à partir d'énergies renouvelables, filière par filière et par types d'installation à l'intérieur de chaque filière en veillant à l'équilibre offre-demande (voir encadré suivant). Tout ce qui concerne l'agriculture et l'alimentation est issu du scénario Afterres [3], un scénario de transition agricole, sylvicole et alimentaire. Le scénario négaMat, qui traite de l'évolution des matériaux et matières premières, fonctionne sur le même principe de dimensionnement progressif des besoins et de structuration de la production selon les impacts des matériaux utilisés.

### Calcul des impacts matières

La démarche négaWatt commence par l'analyse de nos besoins énergétiques avant de proposer une offre parmi différentes sources. La démarche négaMat pose en premier la question des besoins présents et futurs en biens de consommation et d'équipement, puis dans un deuxième temps, où, comment et avec quels matériaux les produire. Ce travail a permis d'évaluer les émissions de gaz à effet de serre dues à ces flux de matières. En prenant en compte les importations (et en faisant des hypothèses sur l'intensité carbone de celles-ci), le scénario négaWatt calcule l'empreinte carbone totale de la France métropolitaine.

### La démarche négaMat renforce l'aspect systémique du scénario

Ce ne sont pas des barres d'acier, ni de l'éthylène que nous achetons en magasin mais des biens de consommation et d'équipement issus de ces matériaux. Quels biens va-t-on acheter et en quelle quantité en 2050 ? Le scénario négaMat explore les solutions permettant de réduire notre empreinte en matériaux à partir de plusieurs leviers : la sobriété d'usage des objets entraîne une moindre nécessité de renouveler les parcs car les produits s'usent moins si l'on s'en sert moins ; la sobriété dimensionnelle (par exemple des tailles de voiture, d'écrans, d'appareils ménagers plus raisonnables) permet une économie de matériaux pour un service similaire ; l'allongement de la durée de vie par le biais de la réparation et de la réutilisation des produits implique un moindre besoin de produits neufs. La réutilisation se développe aujourd'hui avec les ventes d'occasions et les ressourceries. La réparation sera favorisée si les appareils sont démontables, si les pièces détachées sont standardisées et pérennes et les garanties prolongées. Toutes ces pratiques d'économie circulaire font dès aujourd'hui partie des objectifs du Green Deal [4] lancé par la Commission européenne ; les innovations technologiques devront abandonner les pratiques d'obsolescence programmée bannies par la loi de transition énergétique de 2015 et se mettre au service de biens plus robustes et plus légers. Dans le scénario négaWatt 2022, la consommation de biens neufs est calculée dans un modèle dynamique qui intègre

toutes ces dimensions à travers des hypothèses de sobriété mais aussi de réutilisation et d'évolution de la durée de vie. Ce modèle calcule également la quantité de biens hors d'usage et leurs taux de collecte et de recyclage. Le besoin de biens d'équipement et de consommation (BEC) se différencie de la production par les flux du commerce international, c'est-à-dire les importations et les exportations. Leur modélisation prospective fait l'objet d'une analyse de stratégie industrielle évaluant les possibilités de relocalisation de certaines chaînes de production. Enfin la consommation et la production de matériaux dans les années à venir est déduite de celle des BEC par une grande matrice de correspondance qui inclut également les matériaux recyclés (voir encadré suivant).

## DU MATÉRIAU BRUT AU BIEN DE CONSOMMATION

Le cycle de vie d'un bien d'équipement et de consommation débute avec l'extraction de matériaux bruts (biomasses, minerais, énergies fossiles, métaux). Ces éléments sont alors transformés pour produire des matériaux de base (acier, aluminium, ciment, éthylène, ammoniac, etc.). Avant d'obtenir un produit fini, on passe généralement par les matériaux transformés (ou intermédiaires) comme les plastiques ou la métallurgie. La chaîne de transformation peut être plus ou moins longue. À l'étape  $n$ , la production d'un élément correspond à la somme des consommations des différents éléments de l'étape  $n-1$  entrant dans sa composition. Par exemple, pour fabriquer un véhicule particulier aujourd'hui, il faut consommer en moyenne 885 kg d'acier, 103 kg d'aluminium, 155 kg de plastique, etc.

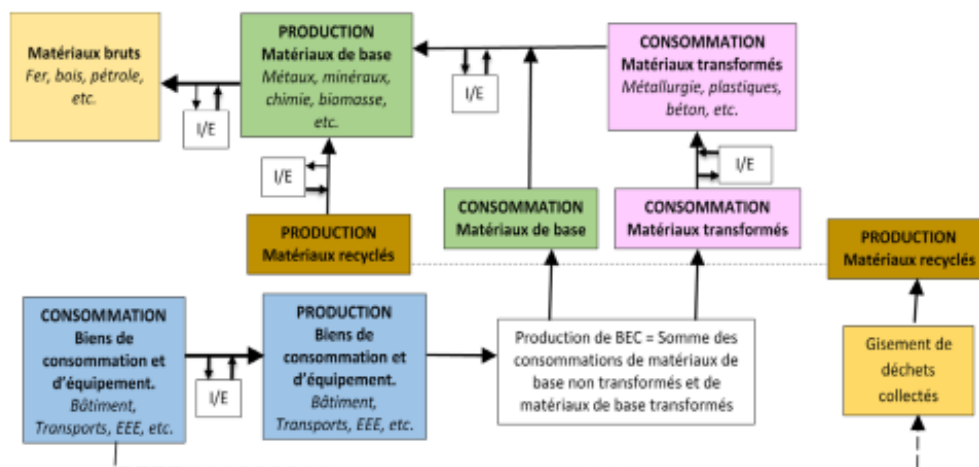


Figure 3: principe de modélisation des Flux Matière depuis les matériaux bruts jusqu'aux biens d'équipement et de consommation finaux

Le schéma ci-dessus représente le diagramme des flux entre ces différents éléments. On voit qu'à chaque étape, il y a des imports / exports (symbolisés par « I / E »). La production et la consommation des BEC, comme celles des matériaux, sont liées par la formule :  $Consommation = Production + Import-Export$ . Le flux temporel du cycle de vie part du matériau brut pour aller jusqu'au BEC. Dans la démarche négaMat, on parcourt le sens inverse : à partir du besoin de biens de consommation, on remonte la chaîne pour déterminer le besoin en matériaux de base puis en matériaux bruts.

### 3. L'évolution des ressources en pneus usagés

#### 3.1. Modélisation des transports de voyageurs et des marchandises

La multiplicité des typologies de déplacement, liées à la fois à leurs motifs et aux lieux où ils se déroulent ou qu'ils relient, nécessite une multiplicité de réponses, qui relèvent aussi bien de la technique pure que de l'organisation sociétale de nos villes et de nos campagnes. Dans le scénario négaWatt, grâce aux statistiques nationales, l'ensemble des déplacements de personnes réalisés en France a pu être classé en 25 catégories et sous-catégories, selon la typologie du déplacement (trajets pendulaires, occasionnels de loisir, professionnels, etc.), sa longueur, et son espace (du centre parisien à l'espace rural). Dans chacune d'entre elles, le scénario fait évoluer de façon différenciée le nombre de voyageurs.km parcourus, ainsi que leur répartition entre une dizaine de modes de transport. Pour chacun d'entre eux, des hypothèses d'évolution des consommations unitaires et des motorisations développées ont été définies. Les taux de remplissage des véhicules particuliers ont également fait l'objet d'évaluations

##### La nécessaire et souhaitable réduction des déplacements

Dans le scénario négaWatt, la population française continue de se déplacer mais, grâce à plusieurs leviers, on aboutit à une réduction du nombre et de la longueur des déplacements, notamment ceux qui sont contraints car liés à l'activité professionnelle et qui sont coûteux pour les ménages. Le premier levier est le déploiement du télétravail. Encore marginal jusqu'en 2019, il s'est fortement développé en 2020, crise sanitaire oblige. En 2050, 40% des travailleurs pratiquent le télétravail dans le scénario négaWatt, en moyenne la moitié du temps.

Enfin, la réduction de la longueur des déplacements est engendrée par une relocalisation de nos modes de vie. Après des décennies à prôner le « plus vite, plus loin », une partie de nos concitoyens aspire à moins se déplacer, à consommer plus local, à profiter des atouts de leur territoire. Cette réduction de la longueur des déplacements pourra être facilitée par un renouveau de l'urbanisme. Les trajets de longue et très longue distance s'effectuent aujourd'hui principalement en avion. Son essor a été fulgurant, avec un doublement des passagers.km observés en à peine plus de 20 ans. Ce déploiement n'étant pas compatible avec les enjeux énergie-climat, le scénario négaWatt envisage une forte réduction du trafic aérien. L'ensemble de ces hypothèses conduit à une réduction globale de 9% des km/habitant/an entre 2019 et 2030, et de 23% entre 2019 et 2050. Un Français parcourt ainsi en moyenne 19 000 km en 2019, 17 000 km en 2030 et 14 500 km en 2050.

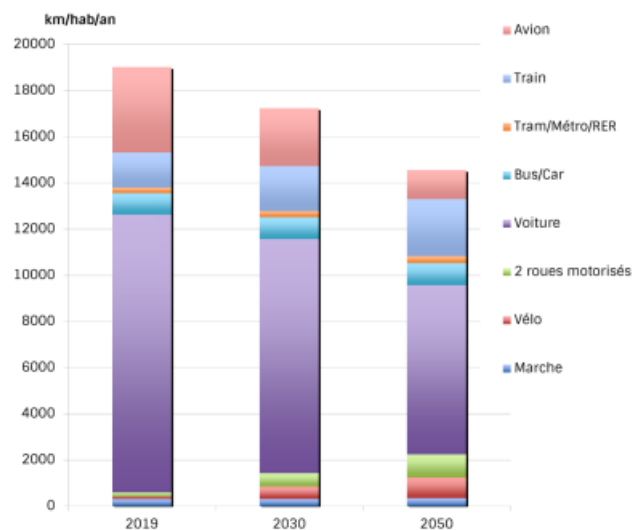
##### Report modal et covoiturage permettent une baisse du trafic routier

En complément de la réduction des déplacements, le trafic routier peut être réduit grâce au report modal vers les transports en commun et modes actifs, et grâce à une augmentation du nombre moyen de personnes par véhicule. Cette réduction présente de multiples bénéfices en diminuant l'emprise de la voiture en milieu urbain, les émissions de polluants locaux, les consommations d'énergie et émissions de GES associées, etc. Les hypothèses de report modal sont différenciées selon la nature et la zone de déplacement. Plus le territoire est dense, plus ce report modal peut s'envisager. Un juste équilibre est visé entre augmentation des transports en commun et maîtrise des investissements associés, de nombreuses agglomérations ayant déjà, par le passé, mis en œuvre des infrastructures lourdes. En parallèle, grâce notamment au déploiement de l'assistance électrique qui rend son utilisation accessible pour des trajets allant jusqu'à plus de 10 km, le vélo connaît une très forte progression.

Certains véhicules routiers particuliers voient eux aussi leur part modale augmenter. C'est le cas du deux-roues motorisé et de la microvoiture. Ces deux modes sont particulièrement pertinents pour les trajets domicile-travail, lorsque des alternatives en transport en commun ou à vélo ne sont pas

accessibles. Avec des motorisations électriques, ils présentent une excellente efficacité énergétique par passager transporté. Pour les trajets longue distance, le train est privilégié face à l'avion. L'utilisation des modes ferroviaires (tramway, métro et surtout le train), est fortement développée pour atteindre plus de 20% du nombre de km/hab./an en 2050 (voir figure 11) alors qu'ils représentaient moins de 10% en 2019. Le recours au vélo et aux deux-roues motorisés est aussi en forte augmentation. L'augmentation du taux de remplissage des voitures est aussi un levier de réduction du trafic routier. Si le covoiturage longue distance a pu se développer depuis une quinzaine d'années en France grâce à l'essor de plateformes dédiées, le covoiturage courte distance n'en est encore qu'à ses débuts. Dans le scénario négaWatt, le nombre moyen de personnes par véhicule particulier passe de 1,7 aujourd'hui à 1,85 en 2030 et à 2 en 2050.

Toutes ces évolutions combinées résultent en une réduction de 37% du besoin de mobilité routière pour les personnes en 2050.



Nombre de km/habitant/an par mode de déplacement dans le scénario négaWatt, en 2019, 2030 et 2050

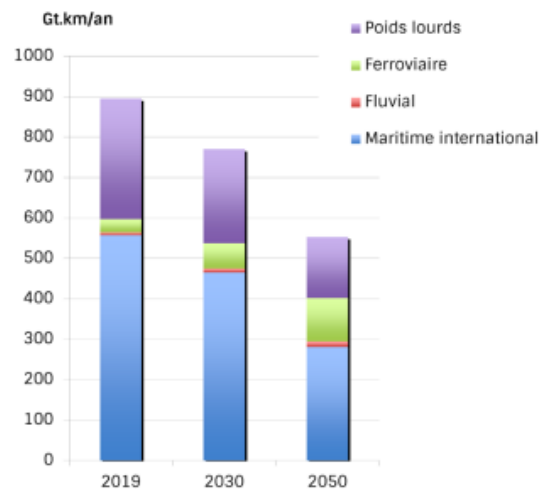
Figure 4: évolution des modes de déplacement des personnes dans le scénario négaWatt

### L'évolution du transport de marchandises

Pour le transport de marchandises, la méthodologie suivie est relativement proche. Les déplacements sont différenciés selon les types (national, international et transit) et les modes de transport. Les consommations unitaires et la répartition des motorisations sont également des indicateurs intégrés dans la modélisation, tout comme le taux de remplissage des poids-lourds. À l'inverse d'autres scénarios de prospective, le scénario négaWatt tient compte des trafics internationaux, aériens (voyageurs) et maritimes (marchandises)

Comme dans chaque secteur de consommation, le scénario négaWatt analyse les besoins afin de déterminer les hypothèses de consommation. Pour le transport de marchandises, la démarche consiste avant tout à évaluer les tonnages qui doivent être transportés. Cette évaluation se base notamment sur l'évolution des tonnages consommés par chacun des secteurs industriels ; les secteurs industrie et transport sont reliés, et les hypothèses du premier influencent les besoins du second. La relocalisation de nos modes de vie est également intégrée pour le transport de marchandises ou denrées pouvant être produites localement. Combinées, ces différentes hypothèses permettent d'aboutir à une réduction globale des tonnes.km transportées de 14% en 2030 et 38% en 2050 par rapport à 2050 (hors

véhicules utilitaires légers mais incluant le transport maritime international). Sur le périmètre fret routier (qui nous concerne ici), la diminution en 2050 est de -20%.



Nombre de tonnes.km transportées dans le scénario négaWatt (en Gt.km) en 2019, 2030 et 2050

Figure 5: évolution du transport de marchandises dans le scénario négaWatt

### 3.2. Evolution de la ressource en pneumatiques usagés

Cette évolution des kilomètres parcourus par type de véhicule permet de déterminer l'évolution de la ressource en pneumatiques usagés.

Une autre hypothèse sous-jacente à ce calcul est que le poids moyen des pneumatiques suit l'évolution du poids moyen (hors batterie) des voitures particulières et véhicules utilitaires légers, lequel a vocation à baisser progressivement, en raison de l'action du régulateur luttant contre l'augmentation de poids et de taille des véhicules. Cette évolution est toutefois compensée en partie par le développement de la motorisation électrique (et le surpoids associé aux batteries).

La légère réduction du parc de voiture<sup>4</sup> (-25% en 2050) va venir également influencer à la baisse sur le volume de véhicules (et donc de pneus) mis au rebut, mais cet effet est d'un ordre moindre, le renouvellement de pneus étant le principal facteur de consommation et de production de déchets.

Les données de notre trajectoire ont été recalées sur les valeurs de gisement 2018 fournies par le rapport Ademe Aliapur de 2021.

Le résultat est une diminution de l'ordre de 40% en 2050 (par rapport à 2018).

<sup>4</sup> L'outil négaMat contient un modèle de parc pour les véhicules, qui permet de suivre finement l'évolution du parc en fonction des ventes, du besoin de mobilité, du taux de remplissage moyen etc.

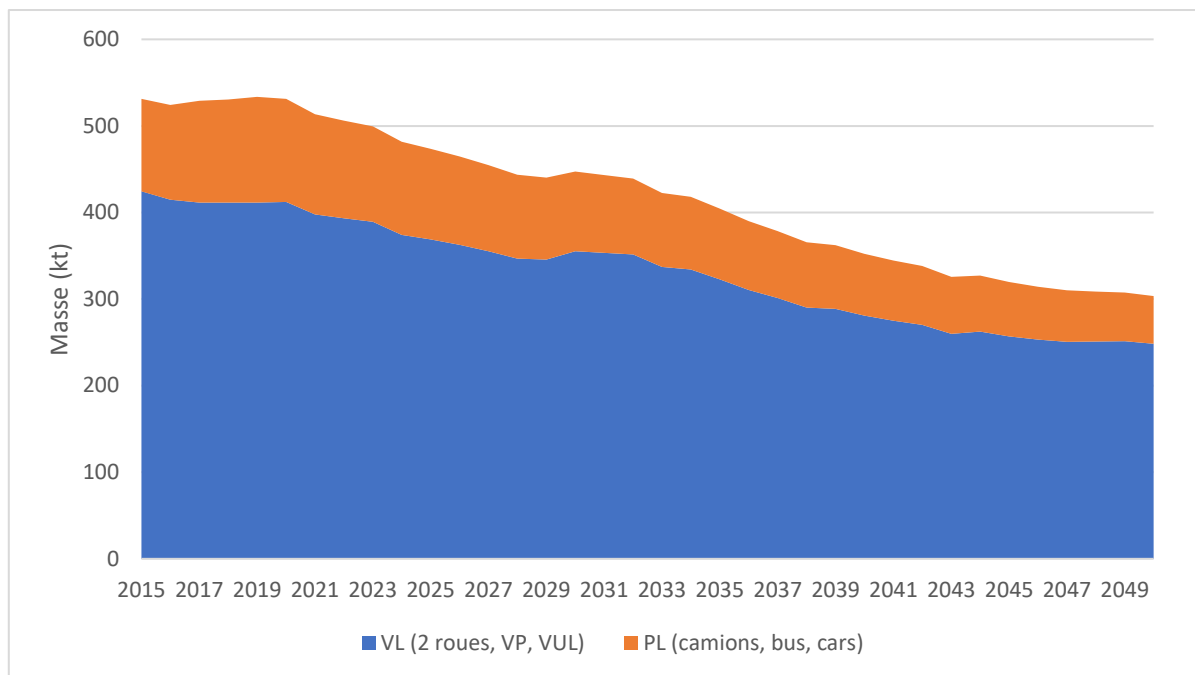


Figure 6: évolution de la ressource en PUNR selon le scénario négaWatt

## 4. Données de base de l'étude

### 4.1. Débouchés de la filière de recyclage pour l'année de référence

L'année de référence a été définie à 2014, car nos données d'intensité énergétique des filières industrielles (dans l'outil MODEIRE/négaMat) sont calées sur cette année. Un travail d'actualisation à 2019 est néanmoins en cours.

Les débouchés considérés pour 2014 ont été fournis par Aliapur et sont détaillés dans le tableau :

	Tonnage (t)	
Collecte	436 797	
Export	139 775	32%
Valorisation en France	297 022	68%
Voies de valorisation en France		
Cimenterie	134 155	45%
Granulation	50 000	17%
Occasion	50 485	17%
TP, GC	25 551	9%
Bassin infiltration /rétention d'eau	16 523	6%
Rechapages	13 630	5%
Autre valorisation énergétique		0%
Autre	2 473	1%
Acierie/fonderie	4 108	1%
Ensilage	97	0%
Total Traite en France		100%

Tableau 1: valorisation des PUNR en 2014

(Données 2014, Aliapur, ADEME)

## 4.2. Composition des pneumatiques

	Passenger Car	Truck tyre -
Matériau	Summer	Steer & Drive
Acier	11,82%	21,42%
Partie « Caoutchouc »	83,97%	78,50%
Caoutchouc synthétique	24,50%	12,05%
Caoutchouc naturel	16,00%	33,91%
Noir de carbone	17,07%	21,43%
Plastifiant (y compris les huiles non hautement aromatiques)	6,30%	1,43%
Antidéggradants	1,45%	1,44%
Accélérateurs et agents de vulcanisation	0,91%	0,59%
Résines de renforcement	0,89%	0,50%
Acide stéarique	0,62%	0,69%
Caoutchouc régénéré / matériau recyclé	0,53%	0,11%
Silice	11,47%	2,51%
Silane	1,10%	0,04%
Soufre	1,00%	1,40%
ZnO	1,40%	2,04%
Sels de cobalt	0,23%	0,11%
Carbonate de calcium	0,21%	0,22%
Oxyde de magnésium	0,01%	0,00%
Bande de roulement prévulcanisée	0,00%	0,03%
Partie « Textiles »	4,22%	0,08%
Polyester	1,81%	0,00%
Nylon	1,28%	0,08%
Rayon	1,12%	0,00%

Tableau 2: composition moyennes des pneumatiques. (Recytire [5])

### 4.3. Facteurs d'émission et pouvoir calorifique des pneumatiques usagés

	PUNR catégorie A	PUNR catégorie B	PUNR catégorie C	PUNR catégorie D	Granulats		MIX
PCI (mJ/kg)	28,4	28,5	34,5	32	35		28,8
gWh/t	7,9	7,9	9,6	8,9	9,7		8,0
Carbone	66,0%	65,2%	80,5%	78,8%	81,9%		66,7%
Biomasse (% masse totale)	18,9%	28,0%	19,4%	28,1%	32,1%		20,9%
FE (t CO2/t)	1,73	1,36	2,24	1,86	1,83		1,68
FE (t CO2/TJ)	60,8	47,9	64,9	58,1	52,2		58,5
FE (kg CO2/kWh)	0,22	0,17	0,23	0,21	0,19		0,21
Facteurs d'émissions nettes incluant le carbone de biomasse							
2021	PUNR catégorie A	PUNR catégorie B	PUNR catégorie C	PUNR catégorie D	Granulats		MIX
PCI (mJ/kg)	28	26,7	34,5	35	35		28,2
gWh/t	7,8	7,4	9,6	9,7	9,7		7,8
Carbone	67,0%	62,5%	79,0%	74,8%	70,0%		66,8%
Biomasse (% masse totale)	23,9%	30,8%	35,0%	34,0%	32,0%		26,0%
FE (t CO2/t)	1,58	1,16	1,61	1,50	1,39		1,50
FE (t CO2/TJ)	56,4	43,5	46,8	42,7	39,8		53,2
FE (kg CO2/kWh)	0,20	0,16	0,17	0,15	0,14		0,19
Facteurs d'émissions nettes hors carbone de biomasse							

Tableau 3: Facteurs d'émission et pouvoir calorifique des PUNR

Source Aliapur

### 4.4. Les facteurs d'émissions des combustibles

Les facteurs d'émission pris en compte sont les suivants :

	Electricité	Vapeur	Charbon	Gaz nat	GPL	Autres PP	Biomasse	PNUR	Non ER	H2
2014	0,037	0,000	0,341	0,202	0,227	0,264	0,000	0,140	0,112	0,000
2050	0,006	0,000	0,341	0,000	0,227	0,264	0,000	0,140	0,112	0,000

Tableau 4: facteur d'émission des combustibles 2014 puis 2050 (kgCO2eq/kWh)

(Sources : ADEME et Aliapur pour les PUNR)

	PCI (GJ/t)	PCI (kWh /kg)	Fe (KCO2e/kg)	Fe (KCO2e/kWh)
Textile	23	6,4	1,7	0,26
Naphta	45	12,5	3,3	0,264

Tableau 5: PCI et facteur d'émission du textile et du Naphta

## 5. Evolution des débouchés de la filière du recyclage

### 5.1. Evolution de l'utilisation comme combustibles pour la production de ciment

L'évolution de la production de béton selon le scénario négaWatt passe de 129 Mt avec une forte diminution dans le secteur du bâtiment, due à plusieurs facteurs : ralentissement de la croissance démographique et donc du besoin en nouveaux logements, priorisation de la rénovation, et accroissement de la part de construction bois.

	Unité	2014	2050
Bâtiment	Mt	82,99	32,70
Ouvrages d'art	Mt	11,03	8,61
Voirie	Mt	36,62	22,69
Réseau ferré	Mt	0,43	0,55
Eolien	Mt	0,02	1,09
Photovoltaïque	Mt	0,000	0,06
Méthanisation	Mt	0,01	4,14

Tableau 6: évolution de la consommation de béton dans le scénario négawatt

D'où une production de ciment qui évolue de 16,3 Mt à 8,68Mt.

Malgré cette baisse de la production de ciment, le besoin en combustible [7491 GWh] est supérieur à la ressource pneumatiques usagés, et le pourcentage de cendre (27% soit environ 80 kt) étant largement inférieur aux charges du ciment (2,8Mt).

Le débouché « cimenterie » est donc pérenne en volume. **Attention toutefois**, les combustibles fossiles utilisés en cimenterie sont substituables par des ressources renouvelables : dans le scénario négaWatt, on trouve en 2050 42% de gaz (100% renouvelable), 19% de biomasse, 26% de CSR et le reste de PUNR. Dans ce contexte, la ressource substituée permet de ne pas solliciter les filières bioénergies (gain énergétique) mais ne génère pas de réduction marginale d'émissions GES à long terme.

Nous traiterons de plus près les considérations de compétitivité en termes d'émissions de CO2.

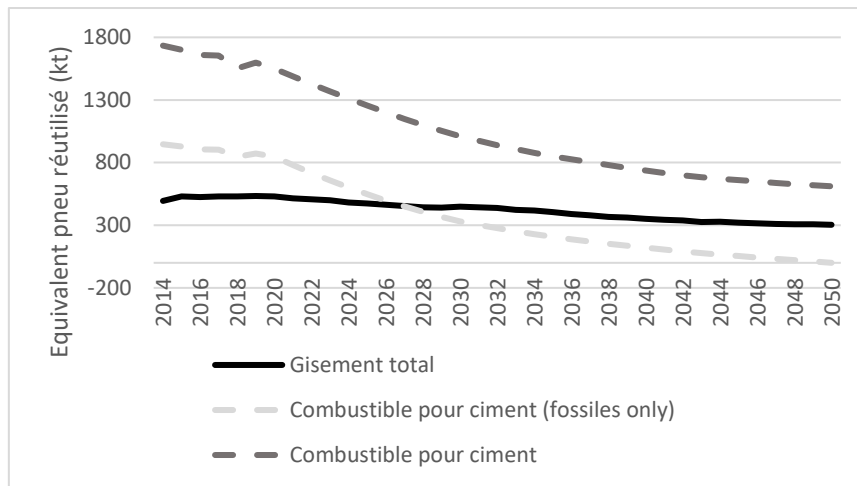


Figure 7: évolution du débouché des PUNR comme combustibles dans les cimenteries

## 5.2. Evolution du débouché dans les aciéries électriques.

L'utilisation du PUNR dans la fabrication de l'acier (4000 tonnes) est actuellement tout à fait marginal vis à vis du volume d'acier produit en France (environ 10 Mt d'acier haut fourneau et 5 Mt produit par la filière électrique), pour un besoin en combustibles de 46 TWh, couvert principalement par le charbon (84%) et le gaz naturel (14%).

La valorisation de PUNR au sein de la filière des hauts fourneaux (BOF) n'est pas vouée à se développer significativement, du fait du taux d'incorporation maximum, et des perspectives incertaines de cette technologie difficile à décarboner. Dans le scénario négaWatt, la filière hauts-fourneaux est éliminée en 2035 (cf. saut de la courbe en pointillés sur le graphique ci-dessous), au profit de la réduction directe à l'hydrogène. Le scénario négaWatt envisage ainsi en 2050 une production d'acier de 11,3 Mt d'acier 100% issu de la filière arc électrique (EAF), dont 4,1 Mt produit par le procédé de réduction directe à l'hydrogène<sup>5</sup>, le reste provenant de ferrailles recyclées.

Ce besoin de l'aciérie électrique permettrait d'absorber dès à présent environ 100 kt de PUNR, et pourrait à terme plus que doubler ce potentiel avec le déploiement de la filière EAF comme expliqué précédemment. Cela représenterait alors 72% du gisement total de PUNR en 2050.

A noter cependant : comme pour les cimenteries, le gain GES de la substitution s'estompe avec le temps : si on début on substitue exclusivement de l'antracite et du coke (impact GES maximal), le passage progressif des aciéries électriques aux combustibles gaz (progressivement renouvelable) et à la réduction à hydrogène va amoindrir l'impact GES marginal de la substitution par des PUNR. Restera alors l'intérêt d'économiser de l'hydrogène (et du biogaz) difficiles à produire.

<sup>5</sup> NB : on a supposé ici qu'il était possible de substituer une partie de l'hydrogène de la filière EAF hydrogène, par du PUNR. Cette hypothèse reste néanmoins à confirmer de source industrielle, mais ne remet de toute façon pas en cause la prévision d'un légère augmentation du débouché en aciérie électrique, lié à une augmentation progressive de la récupération de ferraille et donc à l'augmentation de la production de la filière arc électrique classique.

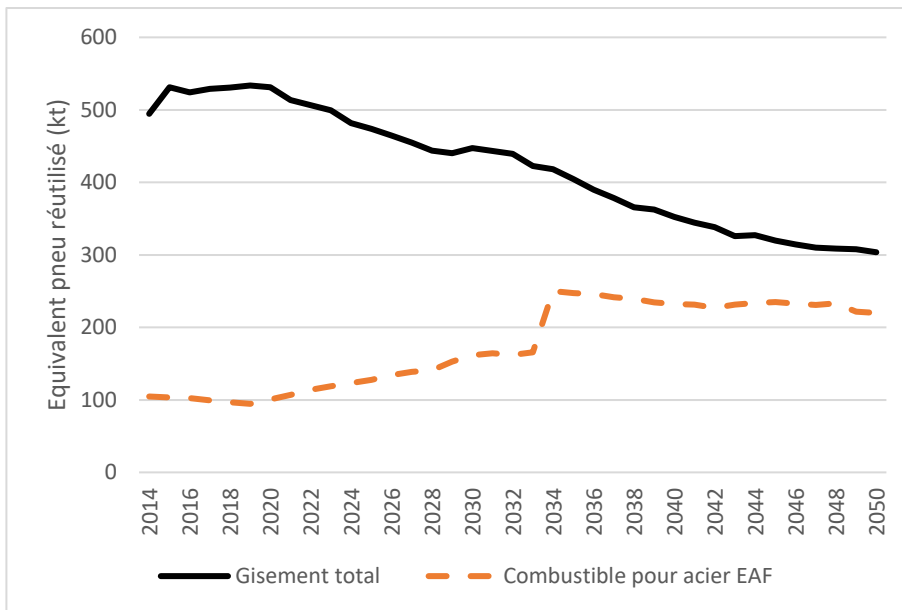


Figure 8: évolution du débouché des PUNR comme intrants dans la fabrication d'acier

**Lecture du graphique ci-dessus :** en 2014, si l'intégralité des PUNR était valorisée en acier EAF, à hauteur du taux maximum selon littérature (rapport Aliapur Arcelor), on pourrait écouler 103 kt de pneus dans cette filière (courbe en pointillés orange). A comparer au gisement de PUNR estimé à 495 kt sur cette année (courbe noire). A horizon 2050, ce ratio entre valorisation max en filière acier EAF et gisement de PUNR augmente mais ne dépasse pas 100%. On pourrait donc en théorie tout passer dans cette filière à long terme, sans être contraint par la disponibilité de PUNR.

### 5.3. Autres débouchés

Nous avons modélisé la consommation de semelle sous traverse de chemin de fer de la façon suivante : les traverses sont constituées à 100 % de granulats de PUNR moulés. La quantité de traverses utilisées est dépendant de la longueur des lignes ferroviaires installées ou renouvelées, qui augmente en proportion de l'augmentation du trafic. Il est à noter que compte tenu d'une modélisation du réseau ferroviaire très incertaine (l'hypothèse de proportionnalité est prise par défaut en l'absence de données de la SNCF), le chiffre de 150 kt doit être considéré comme un ordre de grandeur uniquement. La tendance à la hausse reste néanmoins plausible.

Les autres types d'objets moulés (terrains de sport ou autre) ne sont pas modélisés dans le scénario négaWatt, mais nous évaluerons néanmoins l'intérêt de ce débouché d'un point de vue émissions et consommations d'énergie.

Le débouché « bitume » devient négligeable. En effet, si l'entretien du réseau routier rend nécessaire la consommation de bitume, celui-ci est considéré comme presque entièrement recyclé.

Le rechapage dépend directement de la part de marché de ce type de pneus, qui reste quoiqu'il en soit assez modéré actuellement, et qui ne peut de toute façon pas représenter un usage majeur sur le long terme.

Les utilisations de PUNR dans le génie civil ne sont pas modélisées spécifiquement dans le scénario négaWatt, mais la quantité d'ouvrages reste relativement conséquente, ce qui indique un certain potentiel d'usage :

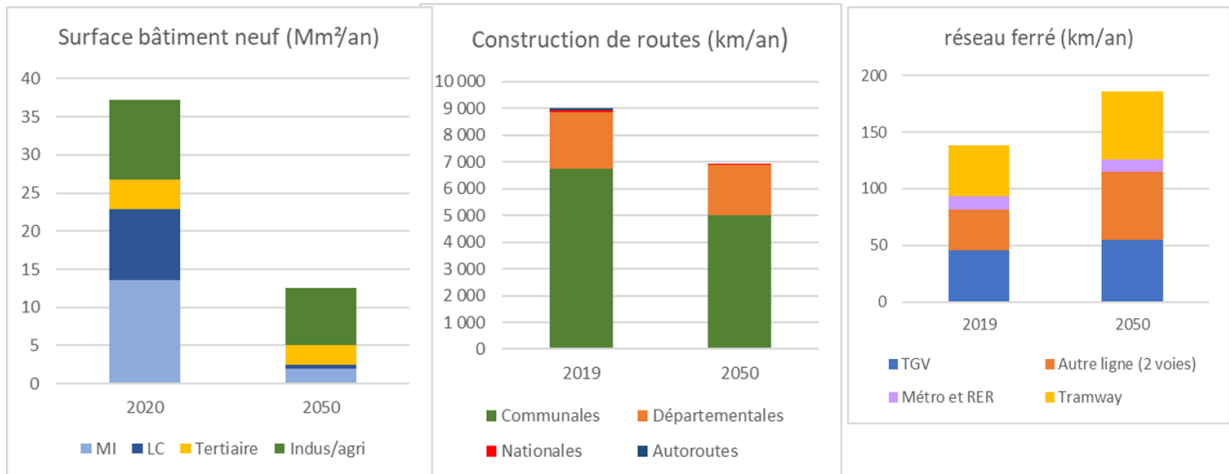


Figure 9 évolutions des TP et génie civil dans le scénario négaWatt

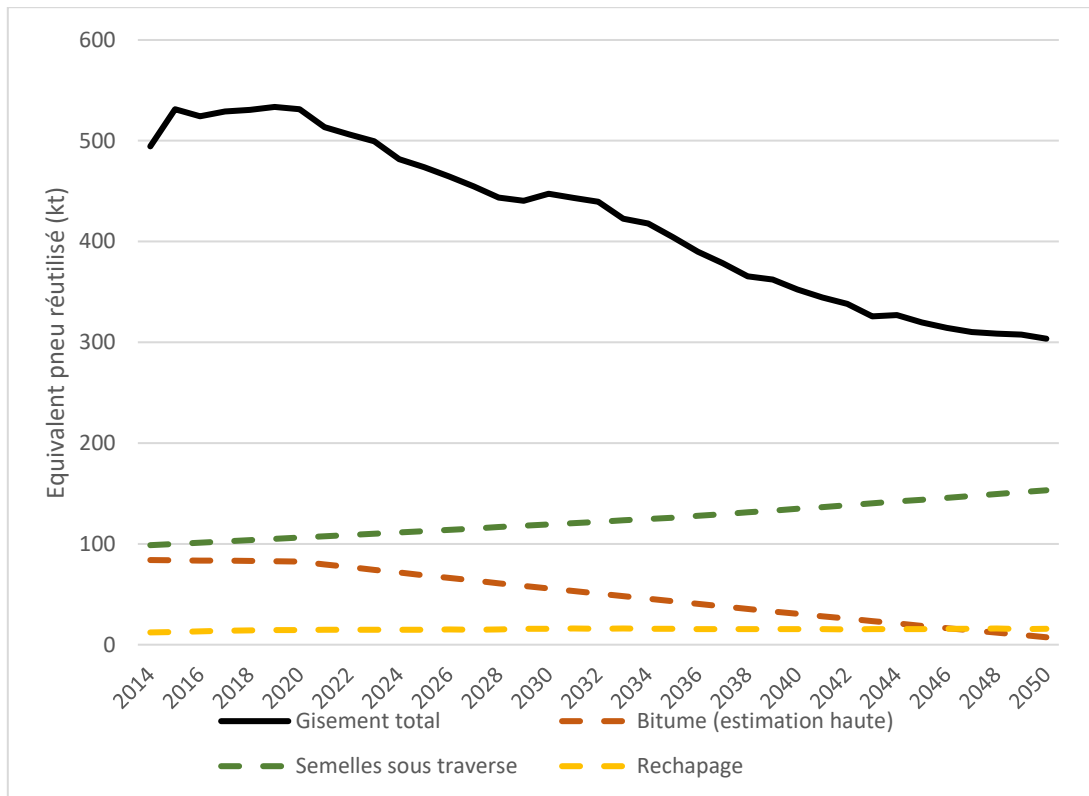


Figure 10: évolution des débouchés " autres "

Conclusion sur l'évolution des débouchés :

Parmi les débouchés actuels des pneumatiques usagé :

- Le ciment qui peut à lui seul absorber l'entièreté de la collecte, l'acier et les objets moulés peuvent être considérés comme des débouchés pérennes, ces deux dernières catégories étant en devenir (débouché encore peu développé à l'heure actuelle)
- Le débouché bitume, si le recyclage se développe conformément à la prospective négaWatt, va se restreindre
- Enfin les débouchés en génie civil, pour lesquelles négaWatt ne fait pas de prospective détaillée, devraient rester significatifs

## 6. Comparaison des différentes voies de valorisations en termes d'émissions de gaz à effet de serre et de consommation énergétique

Nous avons vu dans les parties précédentes que les débouchés actuels principaux des pneumatiques usagés sont pérennes en dehors des enrobés routiers. La question se pose donc de définir un ordre de mérite permettant de prioriser les voies de valorisation parmi celles existantes ou nouvelles. La méthode suivie pour définir cet ordre de mérite des différentes voies de valorisations du point de vue environnementale a été d'identifier de combien la filière contribue en l'état actuel (année de référence 2014) et contribuerait (dans l'hypothèse d'un changement de voies de valorisation) à la réduction des émissions de gaz à effet de serre de la France et à la réduction des consommations énergétiques de la France.

Le choix d'utiliser l'un de ces 2 indicateurs dépend de l'horizon temporel :

- A court terme, le critère de contribution à la réduction des gaz à effet de serre de la France permet de différencier les voies de valorisation,
- A l'horizon 2050, ce critère devient non discriminant car les émissions de tous les secteurs tendent vers zéro (à l'exception des émissions de process sur lesquelles la valorisation de PUNR n'a pas d'effet). La réduction des consommations énergétique devient alors le principal critère de choix, les contraintes d'approvisionnement en énergie décarbonée demeurant d'actualité pour des questions de coûts et d'acceptabilité.

La valorisation des PUNR n'ayant pas d'impact sur un grand nombre de secteurs (bâtiment, transport par exemple), seuls les secteurs impactés par la valorisation des pneumatiques, c'est-à-dire les secteurs de fabrication des pneumatiques, les secteurs amont de la fabrication des pneumatiques, et les secteurs aval de valorisation des PUNR sont étudiés.

En synthèse, le calcul des émissions de gaz à effet de serre et les consommations énergétiques du sous-ensemble de l'économie française concerné par la fabrication des pneumatiques et leur recyclage, nous permet de déterminer un ordre de mérite des différentes voies de valorisation des pneumatiques.

### 6.1. Secteur modélisés

NégaMat utilise pour ses modélisations un découpage de l'économie française en secteur énergétique, basée sur la Nomenclature Commerciale de l'Energie ou NCE. Nous incluons dans notre calcul les secteurs de fabrication des pneumatiques, les secteurs amont de la fabrication et l'aval qui inclut les débouchés des PUNR : acier, ciment, pyrolyse du noir de carbone, pyrogazéification.

Les secteurs amont sont déduits de la composition du pneumatique (certains comme l'acier étant à la fois à l'amont et à l'aval) :

Composition réelle	%	Composition modélisée	%
Acier	13,9%	Acier	13,9%
Caoutchouc synthétique	21,8%	Caoutchouc synthétique	21,8%
Plastifiant (y compris les huiles non Anti dégradants	5,3%	Autres matériaux de base organique	9,0%
Accélérateurs et agents de vulcanisation	1,4%		
Résines de renforcement	0,8%		
Acide stéarique	0,6%		
Caoutchouc naturel*	20,1%		
Noir de carbone	18,0%	Noir de carbone	18,0%
Caoutchouc régénéré / matériau recyclé	0,4%	Non pris en compte*	0,4%
ZnO	1,5%	Chimie minérale	3,90%
Silane	0,9%		
Soufre	1,1%		
Sels de cobalt	0,2%		
Carbonate de calcium	0,2%		
Oxyde de magnésium	0,0%		
Silice	9,5%	Silice	13,5%
Textile	3,3%	Textile	3,3%
dont Polyester	1,4%	Nylon	3,30%
dont Nylon	1,0%		
dont Rayonne	0,9%		
dont Aramide	0,0%		

Tableau 7: secteurs d'activité amont de la fabrication des Pneumatiques

Les secteurs aval considérés dans la modélisation sont les débouchés actuels et possible : ciment, pyrolyse du noir de carbone, pyrogazéification.

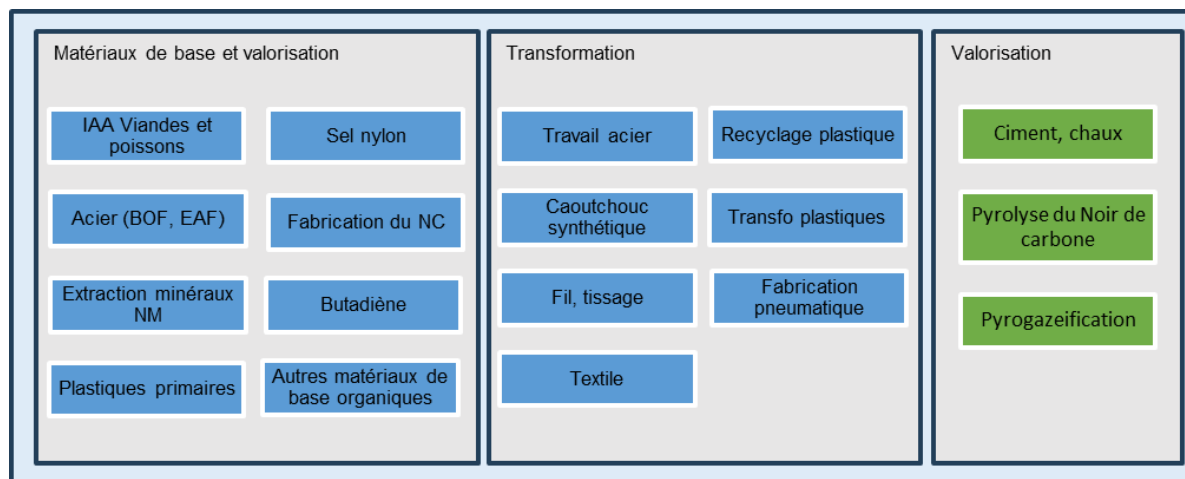


Figure 11: Sous-système modélisé

Les secteurs non considérés sont :

- La silice, car les intensités énergétiques liées au secteur extraction de minerais non métalliques sont négligeables
- La chimie minérale, de poids minime, par manque de données dans le modèle négaMat
- Le caoutchouc naturel, considéré comme non émetteur net de gaz à effet de serre.

## 6.2. Principe de calcul des émissions des gaz à effet de serre pour une étape de transformation

Pour chacun de ces secteurs, les consommations énergétiques et les émissions de CO<sub>2</sub>e sont calculés de façon arithmétique à partir des intensités énergétiques et des combustibles utilisés par le secteur NCE. Les données sont en général existantes dans l'outil négaMat, en dehors de la pyrolyse du noir de carbone et de la pyrogazéification pour lesquelles elles proviennent de la littérature

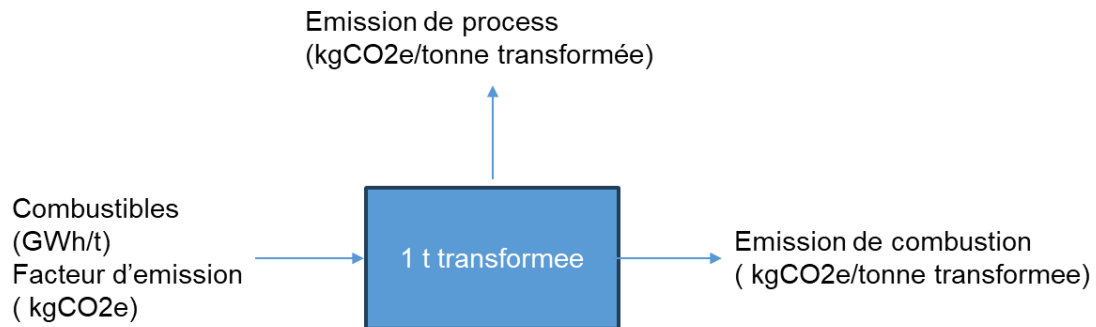


Figure 12: principe de calcul des émissions de GES

Exemple de la fabrication du caoutchouc synthétique : on calcule un facteur d'émission de 0,268 kg CO<sub>2</sub>e/ Kg de caoutchouc fabriqué.

PRODUCTION TERRITORIALE		Prod Mt	INTENSITES ENERGETIQUES POUR LA FRANCE											COMBUSTION	
			Electricité kWh/t	Combustible kWh/t	Vapeur %	Charbon %	Gaz nat %	GPL %	Autres PP %	Biomasse %	PNUR %	Non ER %	H2 %	CO2 Comb MTCO2	
25	Caoutchouc Synthétique	1,000	161	1 400	21%	19%	56%	0%	3%	0%	1%	0%	0%	0,268	

Tableau 8: calcul des émissions de GES dues à l'étape de fabrication du caoutchouc synthétique

## 6.3. Les scénarios de valorisation étudiés

Pour chaque voie, nous avons calculé ce que seraient les émissions de gaz à effet de serre et la consommation énergétique du système modélisé si tous les pneumatiques usagés non réutilisés étaient recyclés par cette voie.

Nous avons pris en compte certains des voies de valorisation actuelles des pneumatiques usagés (ciment, acier, objets moulés) et les voies en développement : recyclage du noir de carbone par pyrolyse et pyrogazéification par électrolyse.

Scénarios	Valorisation (hors rechapage et occasion)
Baseline	Cf. usages décrits en chapitre 4
Sans valorisation	Pas de valorisation énergétique ou matière
100% ciment	232 kt de PUNR utilisés comme combustible dans les cimenteries
100% acier	232 kt PUNR utilisés comme réducteur dans les aciéries électriques
100% noir de carbone	232 kt PUNR pyrolysés

100% objets moulés	232 kt de PUNR : 190 kt de poudrette utilisée dans les objets moulés, 32,2 kt acier recyclés, 9,6 kt textile utilisés en énergie
100% pyrogazéification électrique	232 kt PUNR : 189 kt pyrogazéifié, 41 kt d'acier recyclés

Tableau 9: les scénarios de valorisation simulés

La valeur de 232 kt provient des données Ademe Aliapur en 2014, en laissant de coté les exports, et les réutilisations (occasion, rechapage).

Pour chaque scénario, les PUNR substituent des matériaux à fabriquer ou des combustibles, nous allons calculer les émissions de GES du système en faisant varier les quantités matières à fabriquer (les écarts étant indiqués comme quantités matières évitées) et les combustibles utilisés dans les secteurs aval. Nous allons détailler ces évolutions pour chaque scénario simulé.

#### Scénario « baseline » et « sans valorisation »

Le scénario « baseline » correspond au scénario négaWatt en termes de quantités matières fabriquées. Nous le différencions d'un scénario « sans valorisations » par les quantités de matériaux dont la fabrication est évitée et par l'usage de PUNR comme combustible en substitution du charbon dans les processus de fabrication du ciment et les aciéries.

Calcul de la quantité matière évitée :

Composition des PUNR				Acier	Caoutchouc synthétique	Autres chimie organique	Caoutchouc naturel	Noir de carbone	Silice et Minéraux	Textile
				13.9%	21.8%	9.0%	20.1%	18.0%	13.5%	3.3%
Voie de valorisation	Quantites valorisees	Transformation								
Réemploi	50485	PUNR	Quantité (t)	7017	11006	4544	10147	9087	6815	1666
Rechapage	13630	PUNR	Quantité (t)	1895	2971	1227	2740	2453	1840	450
Objet moule		Acier /Poudrette/textile	Utilisation	Acier	Caoutchouc	Autres chimie organique	Caoutchouc synthétique	Noir de carbone	Silice et Minéraux	Energie
	50000	Acier /Poudrette/textile	Quantité (t)	6950	10900	4500	10050	9000	6750	1650
Aciérie	4108	Broyat fin	Utilisation	Acier	Energie	Energie	Energie	Energie	silices	Energie
			Quantité (t)	571	896	370	826	739	555	136
Ciment	134155	Broyat	Utilisation	Clinker	Energie	Energie	Energie	Energie	Clinker	Energie
			Quantité (t)	18648	29246	12074	26965	24148	18111	4427
TP, GC	25551	Broyat	Utilisation	Remblai (42074 t)						
Bassin	16523	Broyat								
Total	294452		Matériaux économisés	Acier	Caoutchouc synthétique	Autres chimie organique	Caoutchouc naturel	Noir de carbone	Silice et Minéraux	Textile
			Quantité (t)	16433	34927	10270	12887	20541	26766	2116

Tableau 10: Quantités matière évitées grâce à la valorisation des PUNR

#### Calcul énergétique

Le pouvoir calorifique d'un PUNR étant de 7,8 kWh/kg [Aliapur, J.P. Faure], les apports énergétiques des PUNR sont :

	Quantité	Usage énergie
Cimenterie	134 kt	1045 GWh en substitution du charbon
Aciérie	4,1kt	32 GWh en substitution du charbon

Tableau 11: apports énergétiques des PUNR dans les cimenteries et aciéries

D'où des répartitions de combustibles suivants

		Charbon	Gaz nat	GPL	Autres PP	Biomasse	PUNR	Non ER
Réel 2014	Valorisation en 2014							
	acier bof	84.0%	14.1%	0.0%	0.6%	0.7%	0.1%	0.0%
	acier elec	84.1%	14.1%	0.0%	0.6%	0.7%	0.0%	0.0%
	ciment	12.2%	16.3%	0.2%	42.9%	8.5%	4.9%	15.1%
Sans valorisation	Pas de réutilisation ni de recyclage							
	acier bof	84.1%	14.1%	0.0%	0.6%	0.7%	0.0%	0.0%
	acier elec	84.1%	14.1%	0.0%	0.6%	0.7%	0.0%	0.0%
	ciment	17.2%	16.3%	0.2%	42.9%	8.5%	0.0%	15.0%

Tableau 12: impact des PUNR sur la répartition des combustibles dans la fabrication du ciment et d'acier

Nous considérons que les voies de valorisation comme matériau de remblai ne permettent pas de gain en gaz à effet de serre, les broyats de pneumatiques se substituant à des minerais non métalliques, dont l'empreinte énergie/ gaz à effet de serre est négligeable

Scénario « 100% ciment »

Dans ce scénario, nous prenons en compte une quantité de PUNR hors réemploi et hors export, soit 230 kt qui alimentent les cimenteries en France, le reste à l'export

➔ 1840 GWh Energie, soit 9,6 % du mix venant en substitution du charbon

Comme tous les PUNR sont utilisés en cimenterie, il est nécessaire de produire les quantités de matériau supplémentaires suivantes :

Matériaux a fabriquer	Acier	Caoutchouc synthétique	Autres chimie organique	Caoutchouc synthétique	Noir de carbone	Silice et Minéraux
Quantité (t)	7'521	10'900	4'500	10'050	9'000	6'750

Tableau 13: matériaux supplémentaires à fabriquer pour le scénario de valorisation "100% ciment"

Il est également nécessaire de remplacer 33 GWh de PUNR par du charbon dans les aciéries

(Textile énergie 1650 t)

Scénario « 100% acier »

Dans ce scénario, les PUNR broyés sont entièrement utilisés comme intrants des hauts fourneaux, ou des aciéries électriques, l'acier étant recyclé et le carbone venant en substitution du charbon comme agent réducteur.

On recycle donc tout l'acier auparavant inclus dans le ciment, les enfouissements (bassin et génie civil), soit 24,5 kt d'acier recyclés supplémentaires par rapport au réel 2014.

Mais on doit fabriquer les matériaux supplémentaires nécessaires à la fabrication des objets moulés

Utilisation	Acier	Caoutchouc synthétique	Autres chimie organique	Caoutchouc synthétique	Noir de carbone	Silice et Minéraux
Quantité (t)	6950	10900	4500	10050	9000	6750

Tableau 14: matériaux supplémentaires à fabriquer pour le scénario de valorisation 100% acier

Les PUNR remplacent le charbon dans les aciéries et sont remplacés par du charbon dans la fabrication du ciment, les répartitions du combustible sont alors les suivants :

	Vapeur	Charbon	Gaz nat	GPL	Autres PP	Biomasse	PUNR	Non ER	H2
Acier total HF BOF	0%	80%	14%	0%	1%	1%	4,0%	0%	0%
Acier électrique	0%	84%	14%	0%	1%	1%	0%	0%	0%

	Vapeur	Charbon	Gaz nat	GPL	Autres PP	Biomasse	PUNR	Non ER	H2
Acier total HF H2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	17,2%	0%	82,8%
Acier électrique	0%	0%	88%	0%	0%	12%	0%	0%	0%

Tableau 15: Combustibles utilisés pour le ciment et l'acier en cas de scénario 100% acier (le premier tableau correspond à la situation en année de référence, le deuxième à la prospective 2050)

La logique de calcul est la suivante :

- **En année de référence** : le PUNR vient remplacer du charbon. On a supposé ici par simplicité que l'intégralité du PUNR était valorisé dans la filière hauts fourneaux, mais comme vu précédemment, il sera possible d'en diriger une partie vers la filière arc électrique (pas la totalité, car le gisement dépasse le potentiel de cette filière). Le résultat en terme de réduction GES étant de toute façon le même, puisqu'on remplace le même produit fossile.
- **En prospective (2050)** : on suppose ici que le PUNR est valorisé intégralement en remplacement de l'hydrogène dans la filière EAF H2, ce qui reste à vérifier en terme de faisabilité technique (cf. chapitre 5.2), mais l'analyse en terme de consommation d'énergie évitée reste valide puisqu'on se base ici sur le contenu énergétique du PUNR. Là aussi, il sera possible de diriger une partie de la ressource vers la filière arc électrique classique (pour laquelle le combustible substitué serait à terme un mélange de gaz naturel et de biomasse, le scénario négaWatt postulant la sortie de l'usage charbon dans cette filière).

Scénario « 100% noir de carbone » (pyrolyse)

Dans ce scénario, les 232 kt de PUNR sont pyrolysés

La pyrolyse est autoalimentée, seul le process batch requiert 93 kg/t d'huile lourde pour initier la combustion.

Les facteurs d'émission du process sont de 68,06 kg CO<sub>2</sub>, le détail étant dans le tableau ci-après

**TABLE 3 - CO<sub>2</sub> emission calculation steps.**

The capacity of batch reactor	12 t /batch
Capacity of the burner	301,000 kcal/h
Total operation time	11 h
Total CO <sub>2</sub> generation for 1 t of waste tires pyrolysis	<b>68.06 kg CO<sub>2</sub></b>
<b>Heating oil combustion calculation</b>	
Operation duration with heating oil	3 h
GCV of heating oil	9700 kcal/kg
Heating gas consumption for 1 t waste tires pyrolysis	93 kg
C content of heating oil	85%
CO <sub>2</sub> generation from combustion of heating oil	<b>24.18 kg CO<sub>2</sub></b>
<b>Pyrolysis gas combustion calculation</b>	
Operation duration with pyrolysis gas	8 h
GCV of pyrolysis gas	38.10 MJ/m <sup>3</sup>
Heating requirement for 1 t waste tire pyrolysis supplied by pyrolysis gas	838.79 MJ
Pyrolysis gas consumption for 1 t waste tires pyrolysis	22.02 m <sup>3</sup>
Produced pyrolysis gas volume from 1 t waste tires pyrolysis	167.51 m <sup>3</sup>
The percentage of recovered pyrolysis gas for 1 t waste tires	13.14%
The total C amount in the recovered pyrolysis gas	80.83 kg
CO <sub>2</sub> generation from combustion of pyrolysis gas	<b>43.88 kg CO<sub>2</sub> *</b>
*89% from hydrocarbons and 11% from pyrolysis gas own CO <sub>2</sub>	

Tableau 16: émissions de GES lors de la pyrolyse des PUNR

Source: LCA of waste tire pyrolysis, Mufide Banar January 2015 Fresenius environmental bulletin 24(4)

Les produits de la pyrolyse sont [4] :

32 % d'agglomérat de noir de carbone et de charges, assimilable à du Noir de carbone, et 41% de naphta, 12% d'acier, le reliquat étant du gaz utilisé dans le process de pyrolyse

Au total pour cette filière, on obtient donc comme produits de la pyrolyse de 232 kt de PUNR : 32, 2 kt d'acier (24, 7 kt supplémentaires recyclés) / 64 kt de noir de carbone/ 95 kt de naphta

L'acier et le noir de Carbone recyclés sont comptabilisés dans leurs filières respectives

Il faut fabriquer les matériaux nécessaires à la fabrication des objets moulés, les quantités étant égales à celles du scénario 100% acier (tableau 14)

95 kt de Naphta correspondent 1187 GWh d'Énergie disponible, dont 375 GWh de biomasse (31,6%), nous avons considéré dans la simulation que cette biomasse permettait de substituer des produits pétroliers comme combustible dans la fabrication de ciment, les taux de biomasse sont alors de 10,4 % biomasse au lieu de 8,5%

Enfin nous substituons les PUNR utilisés par la fabrication du ciment et l'acier par du charbon.

Scénario « 100 % objet moulés »

Dans ce scénario, tous les matériaux hors textile et noir de carbone sont recyclés, d'où les quantités évitées suivantes

Matériaux non fabriques	Acier	Caoutchouc synthétique	Autres chimie organique	Caoutchouc synthétique	Noir de carbone	Silice et Minéraux
Quantité (t)	24'496	39'313	16'230	36'248	32'461	24'345

Tableau 17: quantités matières évitées pour le scénario 100% objets moulés

Le textile des PUNR utilisés en 2014 comme remblai, soit 7,7 kt est valorisé comme énergie en tant que CSR. Soit 6 kt supplémentaires par rapport à la base line, soit 38,4 GWh de CSR supplémentaires affectés au ciment par convention (+0,2%)

Le non-usage de PUNR pour l'acier et le ciment conduit à augmenter les parts de charbon dans ces process, au niveau du scénario « sans valorisation »

Remarque : nous avons supposé que ce scénario évite la fabrication de noir de carbone dans la proportion de fabrication des pneumatiques, ce qui est une hypothèse très forte.

### Scénario « 100% pyrogazéification électrique »

Dans ce scénario, les PUNR sont broyés, on obtient pour 232 kt de PUNR :

- 32,2 kt d'acier soit 24, 5 kt t d'acier recyclés supplémentaires par rapport au réel 2014
- 7,7 kt de textile utilise comme CSR (6 kt supplémentaires par rapport à la baseline, soit 38,4 GWh de CSR supplémentaires affectés au ciment par convention (+0,2%))
- Et 192 kt de poudrette qui est l'intrant du processus de pyrogazéification qui nécessite également de l'électricité.

	Unité	Pyrogasification	
		WGS	Electrique
Taux de Carbone Biomasse	%	68	68
CH4 Produit	t/t poudrette	0.37	0.88
PCI CH4	mWh/t CH4	13.2	13.2
Prod Energie (CH4)	mWh/t poudrette	5.2	12.24
CO2 process	tCO2e/t poudrette	1.68	0.27
CO2 process	tCO2e/tCH4	4.52	0.31
CO2 process	tCO2/mWh	0.34	0.02
Consommation électrique	mWh/t	0.64	14.4
CO2 Combustion (total)	kg CO2/kWh	0.19	0.19
CO2 Combustion (fossile)	kg CO2/kWh	0.13	0.13
CO2 (total)	kg CO2/kWh	0.53	0.21
CO2 (fossile)	kg CO2/kWh	0.47	0.15

Tableau 18: données de modélisation du processus de pyrogazéification

Source: Techno-economic and environmental survey of an industrial pyro-gasification and methanation plant for the production of synthetic methane from tyre crumb

EUBCE – 31<sup>st</sup> European Biomass Conference & Exhibition, 5-8 June 2023, Bologna

[7]

Par ce procédé, on produit 1930 GWh de Gaz naturel, à 31,6% de part biomasse. Ces 610 GWh sont intégrés à la fabrication de ciment en remplacement du gaz naturel, et augmentent la part biomasse à 11,6%

Nota sur les données de pyrolyse et de pyrogazéification :

Les données négaWatt sont en général issues de statistiques industrielles et sont issues de consommations réelles de sites industriels. Elles incluent tous les usages énergétiques des sites, incluant chauffage, climatisation, ventilation, éclairage des locaux.

Les données disponibles pour la pyrolyse et la pyrogazéification, issues de la littérature scientifique sont spécifiques au process de fabrication, soit un sous ensemble des consommations des sites industriels. Les facteurs d'émissions et les consommations énergétiques projetées sont donc sous-estimés.

#### 6.4. Comparaison des différentes voies de valorisation

Calcul en émissions

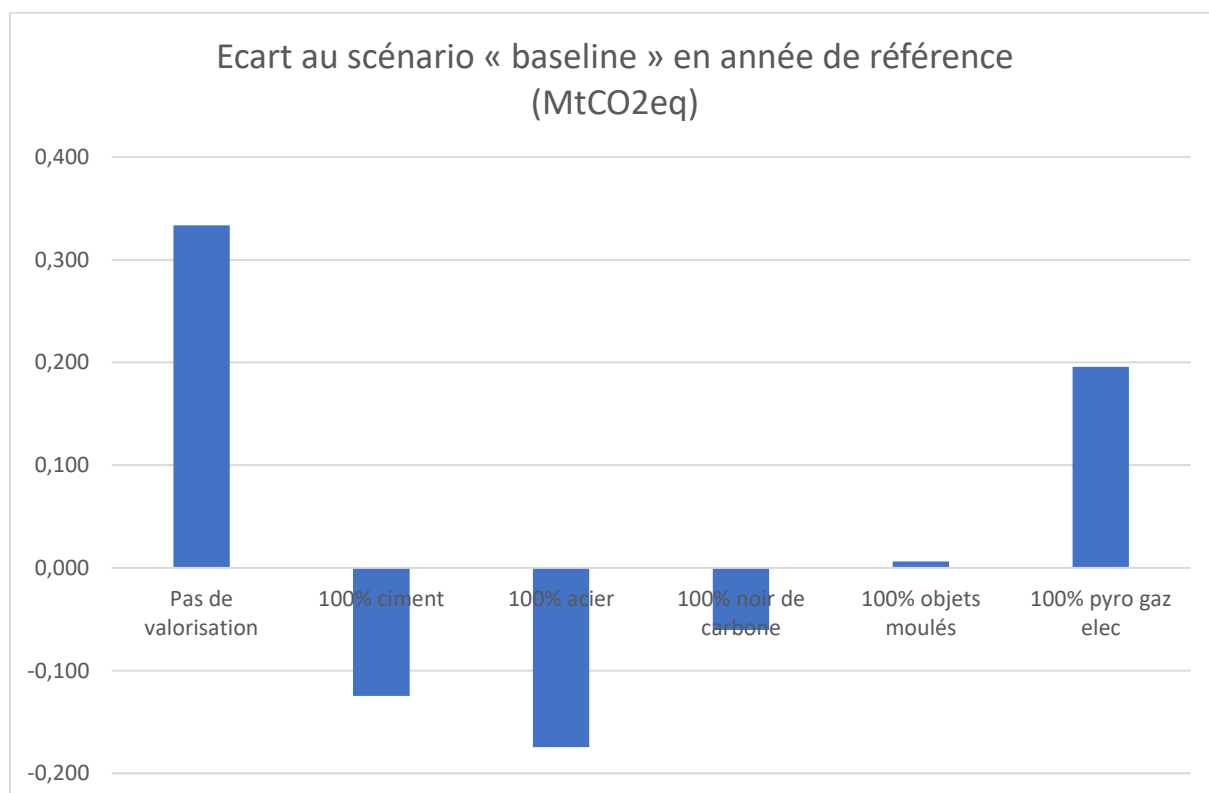


Figure 13: émissions de GES pour les différentes voies de valorisation simulées

On voit sur cette figure que les voies « 100% ciment », 100% acier et 100 % noir de carbone sont moins émettrices que la voie actuelle, l'optimum étant le « 100% acier ».

La voie 100% objet moulé est très proche de la situation actuelle.

La voie 100% pyrogazéification électrique présente un impact négatif sur le bilan GES du système.

Enfin la voie « 100 % pyrogazéification WGS » n'est pas représentée car plus défavorable compte tenu des facteurs d'émissions plus élevés.

## Calcul en énergie

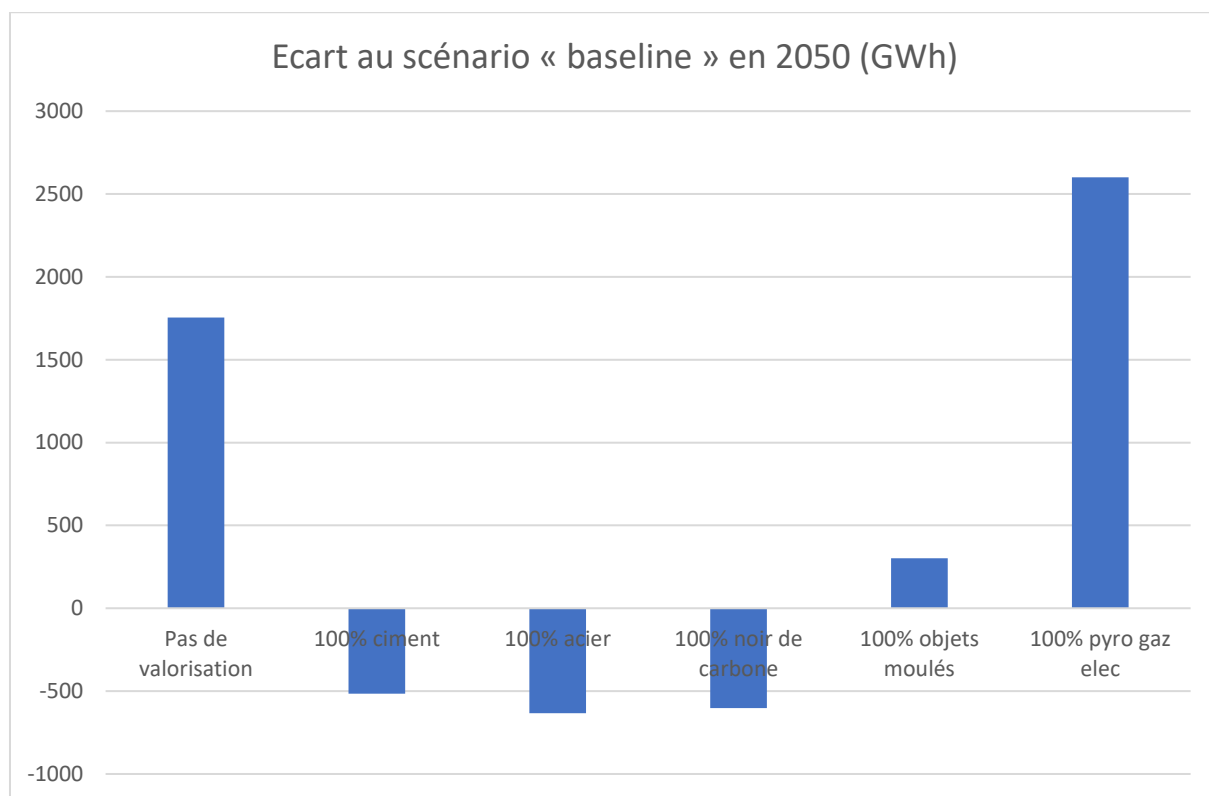


Figure 14: consommation énergétique pour les différentes voies de valorisations

Note sur le remblai : un scénario « 100% remblai » serait équivalent au scénario « sans valorisation. »

### 6.5. Limites de l'étude

Les principales limitations de l'étude concernent les filières « objets moulés » et « noir de carbone ».

Concernant la filière objets moulés, les données négaWatt sont précises concernant la fabrication du butylène et la transformation du caoutchouc, mais les précurseurs du butylène sont mal estimés. D'une façon générale le secteur de la synthèse chimique est mal couvert par le modèle négaWatt à ce jour. Il se peut donc que les gains liés au recyclage du caoutchouc soient sous estimés.

L'hypothèse faite de recyclage de la poudrette est que cela permet d'éviter la fabrication de Noir de carbone pour une quantité égale à celle contenue dans les pneumatiques, qui est une hypothèse forte

Concernant la filière de recyclage du Noir de carbone, les écarts de données entre les données négaWatt et les données de littérature, ainsi que l'écart entre les principales publications sont significatifs.

Les données de négaWatt sont en général issues de statistiques industrielles et sont issues de consommations réelles de sites industriels. Elles incluent tous les usages énergétiques des sites, incluant chauffage, climatisation, ventilation, éclairage des locaux.

Les données disponibles pour la pyrolyse issues de la littérature scientifique sont spécifiques au processus de fabrication, soit un sous ensemble des consommations des sites industriels. Les facteurs d'émissions et les consommations énergétiques projetées dans la simulation sont donc sous-estimés. Il serait souhaitable de disposer pour la pyrolyse de données complètes provenant directement d'un site industriel.

De plus l’hypothèse de la littérature, à savoir que l’amalgame issu du recyclage soit employable comme noir de carbone recyclé, est une hypothèse forte, qui mérite d’être discutée avec les industriels des pneumatiques. Une hypothèse de pourcentage maximum de noir de carbone recyclé pourrait être introduite dans le modèle.

## Conclusion

	Pérennité du débouché	Taille du marché	Réduction GES	Intérêt énergétique	Faisabilité technico économique
<b>100 % ciment</b>	Pérenne	Supérieur à la ressource	Elevée	Elevé	Prouvé
<b>100 % acier</b>	Pérenne	Légèrement inférieur à la ressource	Elevée	Elevé	Prouvé sur EAF classique / A étudier sur EAF H2
<b>100% objets moulés</b>	Pérenne	Moyen à élevé	Neutre à négatif*	Neutre à négatif*	A prouver par application (impact R&D)
<b>Pyrolyse / recyclage du noir de carbone</b>	Pérenne	Moyen	Moyen	Elevé	A prouver (limitations possibles sur le design des pneumatiques)
<b>Pyrogazéification</b>	Pérenne	Elevé	Négatif	Négatif	Pilote industriel / coûts élevés
<b>Bitume</b>	Non pérenne	En décroissance	NC	NC	Limité à des usages spécifiques
<b>Remblai</b>	Pérenne	Supérieur à la ressource	Négatif	Négatif	Prouvé

Tableau 19: comparaison des différentes voies de valorisation

On peut séparer les voies de valorisation de la façon suivante

- La voie acier est à développer
- La voie ciment est à conserver
- Les voies pyrogazéification et bitume sont à abandonner
- Les voies d’usage en remblai sont également à abandonner
- La voie pyrolyse apparait comme moins intéressante à court terme mais compte tenu des limitations exposées et de son intérêt énergétique à long terme, nécessite des investigations complémentaires
- Enfin la voie objets moulés apparait comme moins intéressante à développer mais compte tenu de limitations du modèle, mérite des investigations complémentaires

## Bibliographie

1. Scénario négaWatt, disponible en ligne : <https://negawatt.org/Scénario-négaWatt-2022>
2. <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>
3. Scenario Afterres: <https://afterres2050.solagro.org/decouvrir/scenario/>
4. Recytire, Evaluation de l'intérêt environnemental de différentes techniques de traitement de pneumatiques usagés
5. <https://www.consilium.europa.eu/fr/policies/green-deal>
3. LCA of waste tyre pyrolysis, Mufide Banar January 2015 Fresenius environmental bulletin 24(4)
4. Techno-economic and environmental survey of an industrial pyro-gasification and methanation plant for the production of synthetic methane from tyre crumb
5. EUBCE – 31st European Biomass Conference & Exhibition, 5-8 June 2023, Bologna

## Liste des figures

Figure 1 Répartition sectorielle des émissions de GES en France en 2022 (estimation provisoire). Source : Citepa, 2023 (format SECTEN) .....	4
Figure 2: la démarche négaWatt .....	5
Figure 3: principe de modélisation des Flux Matières depuis les matériaux bruts jusqu'aux biens d'équipement et de consommation finaux .....	7
Figure 4: évolution des modes de déplacement des personnes dans le scénario négaWatt .....	9
Figure 5: évolution du transport de marchandises dans le scénario négaWatt.....	10
Figure 6: évolution de la ressource en PUNR selon le scénario négaWatt.....	11
Figure 7: évolution du débouché des PUNR comme combustibles dans les cimenteries.....	15
Figure 8: évolution du débouché des PUNR comme intrants dans la fabrication d'acier .....	16
Figure 9 évolutions des TP et génie civil dans le scénario négaWatt .....	17
Figure 10: évolution des débouchés " autres " .....	17
Figure 11: Sous-système modélisé .....	19
Figure 12: principe de calcul des émissions de GES .....	20
Figure 13: émissions de GES pour les différentes voies de valorisation simulées.....	26
Figure 14: consommation énergétique pour les différentes voies de valorisations .....	27

## Liste des tableaux

Tableau 1: valorisation des PUNR en 2014.....	12
Tableau 2: composition moyennes des pneumatiques. (Recytire [5]) .....	12
Tableau 3:Facteurs d'émission et pouvoir calorifique des PUNR .....	13
Tableau 4: facteur d'émission des combustibles 2014 puis 2050 (kgCO <sub>2</sub> eq/kWh).....	13
Tableau 5: PCI et facteur d'émission du textile et du Naphta .....	13
Tableau 6: évolution de la consommation de béton dans le scénario négawatt .....	14
Tableau 7: secteurs d'activité amont de la fabrication des Pneumatiques .....	19
Tableau 8: calcul des émissions de GES dues à l'étape de fabrication du caoutchouc synthétique.....	20
Tableau 9: les scénarios de valorisation simulés .....	21
Tableau 10: Quantités matière évitées grâce à la valorisation des PUNR.....	21
Tableau 11: apports énergétiques des PUNR dans les cimenteries et aciéries.....	22
Tableau 12: impact des PUNR sur la répartition des combustibles dans la fabrication du ciment et d'acier .....	22
Tableau 13: matériaux supplémentaires à fabriquer pour le scénario de valorisation "100% ciment" .....	22

Tableau 14: matériaux supplémentaires à fabriquer pour le scénario de valorisation 100% acier .....	22
Tableau 15: Combustibles utilisés pour le ciment et l'acier en cas de scénario 100% acier (le premier tableau correspond à la situation en année de référence, le deuxième à la prospective 2050) .....	23
Tableau 16: émissions de GES lors de la pyrolyse des PUNR.....	24
Tableau 17: quantités matières évitées pour le scénario 100% objets moulés .....	24
Tableau 18: données de modélisation du processus de pyrogazéification .....	25
Tableau 19: comparaison des différentes voies de valorisation.....	28