



**HAL**  
open science

**Analyse de Cycle de Vie appliquée à un chantier d'entretien routier sur la RN 76. Evaluation technique et environnementale d'une couche de liaison d'enrobé bitumineux pour différents taux de recyclage. Inventaire de Cycle de Vie de la couche de liaison**

Agnès Jullien, Pierre Moneron, Anne Ventura, Michel Legret, Dominique Demare, Chantal de La Roche, Michel Schemid, Céline Lachet, David Gaillard, Jack Oudin, et al.

► **To cite this version:**

Agnès Jullien, Pierre Moneron, Anne Ventura, Michel Legret, Dominique Demare, et al.. Analyse de Cycle de Vie appliquée à un chantier d'entretien routier sur la RN 76. Evaluation technique et environnementale d'une couche de liaison d'enrobé bitumineux pour différents taux de recyclage. Inventaire de Cycle de Vie de la couche de liaison. Agnès Jullien. IFSTTAR - Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, pp.117-144, 2006, Etudes et Recherche des Laboratoires des Ponts et Chaussées - série chaussées, 2-7208-2467-4. hal-00932821

**HAL Id: hal-00932821**

**<https://hal.science/hal-00932821>**

Submitted on 17 Jan 2014

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# **Analyse de Cycle de Vie appliquée à un chantier d'entretien routier sur la RN 76**

Evaluation technique et environnementale d'une couche de liaison d'enrobé bitumineux pour différents taux de recyclage

Décembre 2005



L'esprit de recherche au cœur des réseaux

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées  
58, bd Lefebvre. F 75732 Paris Cedex 15

## **Auteurs par organisme et par unités :**

### **Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Bouquenais (44)**

Unité Technologie du Génie Civil et Environnement – Section Développement Durable  
Agnès Jullien  
Pierre Monéron  
Anne Ventura

Unité Eau et Environnement – Section Caractérisation et Transfert des Polluants  
Michel Legret  
Dominique Demare

Unité Matériaux et Structures de Chaussées – Section Liants et Matériaux routiers  
Chantal de la Roche

### **Direction Départementale de l'Équipement, Blois (41)**

Michel Schemid  
Céline Lachet

### **Service d'Étude Technique des Routes et Autoroutes, Bagneux (92)**

David Gaillard

### **Station d'Étude des Matériels Routiers, Blois (41)**

Jack Oudin  
Jean-Pierre Jacques

### **Laboratoires Régionaux des Ponts et Chaussées**

CETE Normandie Centre - Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Saint-Brieuc (29)  
Lionel Odie

CETE Normandie Centre - Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Blois (41)  
Bernard Meriel  
Régis Boittin  
Hervé Cabannes  
Philippe Jumontier  
Sophie Seytre

CETE de l'Ouest - Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées d'Angers (49)  
Karine Lacoste

CETE de Lyon - Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées d'Autun (71)  
Louisette Wendling  
Michel Bernard

## **Avec la contribution par organisme et par unités de :**

### **Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Bouguenais (44)**

Unité Technologie du Génie Civil et Environnement – Section Elaboration des Matériaux  
Bernard Guieysse  
Yvan Baudru

Unité Eau et Environnement – Section Caractérisation et Transfert des Polluants  
Laurence Lumière

Unité Matériaux et Structures de Chaussées – Section Liants et Matériaux routiers  
Olivier Burban

### **Direction Départementale de l'Équipement, Blois (41)**

Michel Pavie  
Claude Sionneau  
Patrice Boucher

### **Service d'Étude Technique des Routes et Autoroutes, Bagneux (92)**

Yves Guidoux

### **Station d'Étude des Matériels Routiers, Blois (41)**

Philippe Semelle  
Robert Tasky  
Gérard Monnière

### **Laboratoires Régionaux des Ponts et Chaussées**

CETE Normandie Centre - Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Blois (41)  
Philippe Breton  
François Bigot  
Alain Charles  
Michel Delaleu  
Laëtitia Heurdier

Ce projet s'est déroulé dans le cadre de l'opération de recherche du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées intitulée « Recyclage et matériaux non conventionnels » au cours de la période 2002-2005, opération pilotée par :

Jean-Claude Auriol

Unité Reconnaissance et Mécanique des Sols - Section Conception des Ouvrages en Terre

Enfin, ce type de réalisation collective n'est possible que grâce à la participation de tous les acteurs concernés : les auteurs souhaitent également remercier tout particulièrement les équipes de fabrication et de mise en oeuvre du Parc Routier de Blois ainsi que la subdivision de Romorentin, respectivement pour la réalisation et le suivi du chantier

## CHAPITRE 5 : INVENTAIRE DE CYCLE DE VIE DE LA COUCHE DE LIAISON

### 5.1. INTRODUCTION AU CALCUL DES FLUX D'INVENTAIRE

Les données produites dans l'inventaire de cycle de vie du système étudié proviennent à la fois de sources bibliographiques et de la collecte expérimentale propre à cette étude présentée dans le chapitre 4.

Parmi les données collectées, certaines découlent directement des mesures effectuées lorsque la méthode de collecte et les unités obtenues correspondent directement à l'unité fonctionnelle. Dans certains cas, l'unité de collecte s'avère différente, et dans d'autres cas la méthode de collecte diffère de l'objectif visé par l'unité fonctionnelle. Dans ces deux cas, il faut respectivement recourir à des méthodes de conversions, et à l'élaboration de scénario.

Enfin certaines données collectées n'ont pas été utilisées dans l'inventaire, pour des raisons différentes, lorsqu'il n'a pas été possible d'effectuer des conversions et/ou d'élaborer un scénario approprié.

L'objet de ce chapitre est de détailler la démarche adoptée pour chacun des procédés figurant dans le système étudié, afin de préserver la visibilité sur la qualité des résultats obtenus.

#### 5.1.1. Rappel du système et de l'unité fonctionnelle

Le système et l'unité fonctionnelle ont été définis en fonction de l'objectif de l'étude dans le chapitre 2. Le système étudié a été précisé à la suite de la réalisation, en fonction des sites de l'étude. Il est schématisé sur la Figure 5 - 1.

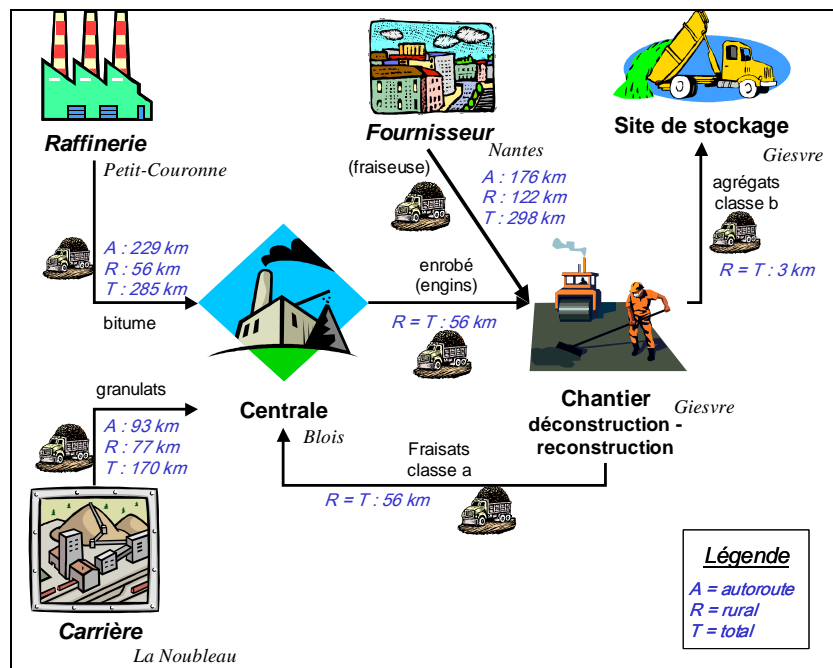










Figure 5 - 1. système étudié en lien avec les sites

L'unité fonctionnelle a également été définie au chapitre 2. Sa déclinaison en fonction du procédé est précisée dans le Tableau 5 - 1.

Procédé de production	Unité fonctionnelle correspondante			
 carrière	Quantité de granulats naturels nécessaire à la production de l'enrobé – dépendant du taux de recyclage			
	0% classique 95 tonnes	10% recyclage 85 tonnes	20% recyclage 75 tonnes	30% recyclage 65 tonnes
 raffinerie	Quantité de bitume nécessaire à la production de l'enrobé et à la mise en œuvre – dépendant du taux de recyclage			
	0% classique 5,18 tonnes	10% recyclage 4,68 tonnes	20% recyclage 4,18 tonnes	30% recyclage 3,68 tonnes
 centrale d'enrobage	100 tonnes d'enrobé à une cadence de 100 tonnes/heure			
 site de stockage	Quantité d'agrégats déconstruits non recyclés - dépendant du taux de recyclage (voir détails 5.2.3)			
 fraisage – balayage	Couche de liaison + roulement sur la longueur d'une planche – vitesse de fraisage dépendante de la masse de fraisats recyclables à produire (voir détails 5.2.3)			
 mise en oeuvre	Couche de liaison d'épaisseur 7 cm sur la surface (150 x 3,8 m <sup>2</sup> ) d'une planche			
 en service	Ouvrage comportant une couche de roulement et la couche de liaison étudiée d'épaisseur 7 cm sur la surface (150 x 3,8 m <sup>2</sup> ) d'une planche			
 transports	Masses de matériaux et nombre d'engins nécessaires par planche sur les distances entre les sites du système - dépendant du taux de recyclage (voir détails 5.3)			

*Tableau 5 - 1. Déclinaison de l'unité fonctionnelle par procédé*

### 5.1.2. Démarche générale d'élaboration des flux d'inventaires

Afin de produire des données d'inventaire, plusieurs méthodes ont été utilisées, en fonction des divers procédés inclus dans le système :

- dans certains cas, les données utilisées sont entièrement issues de sources bibliographiques,
- dans d'autres cas, les données collectées ont dues être complétées par des données bibliographiques,
- dans d'autres cas également, les données collectées ne correspondent pas aux unités de l'inventaire et une méthodologie de conversion a été utilisée,
- enfin, lorsque les données collectées ne correspondent pas aux unités de l'inventaire et qu'aucune méthodologie de conversion n'est applicable, une méthodologie de scénarios a été développée.

Le présent chapitre détaille les différentes méthodologies permettant d'aboutir pour chaque procédé et pour les transports, aux valeurs des flux d'inventaire.

## **5.2. INVENTAIRE DES PROCEDES DE PRODUCTION**

### **5.2.1. Procédé de production des granulats et du bitume**

#### ***Carrière***

En l'absence de données françaises ou européennes globales disponibles, les données qui sont utilisées sont issues d'un ICV réalisé aux Pays-Bas [STRIPPLE, 2001]. Les flux sont donnés pour une carrière typique des Pays-Bas pour un procédé de production comprenant les étapes d'extraction des granulats et de maintenance des engins servant à cette extraction.

Les types de granulats produits ne sont pas précisés dans cette référence. Ils ont été assimilés à ceux de la carrière de La Noubleau qui alimente la centrale de Blois. Les flux de consommations et d'émissions de la carrière ont été calculés en fonction des masses de granulats présentées dans le tableau 4 – 1 du chapitre 4.

#### ***Raffinerie***

Le procédé de production du bitume a été assimilé à un cas recensé dans la bibliographie [EUROBITUME, 1999]. Cet ICV considère une raffinerie d'un modèle comparable à celles d'Europe de l'Ouest, et le procédé de production comprend les étapes d'extraction du pétrole brut, de son transport jusqu'en Europe, de son raffinage en bitume de grade 50/70 et de son stockage.

Le liant utilisé pour le chantier RN 76 est un 35/50. Les flux associés à sa production ont été supposés similaires à ceux d'un 50/70, car des données précises concernant la raffinerie de Petit-Couronne qui approvisionne la centrale d'enrobage, ne sont pas disponibles.

### **5.2.2. Centrale : procédé de production de l'enrobé**

Des mesures très diverses ont été collectées à la centrale, et sont présentées dans le chapitre 4. Certaines de ces données (consommation électrique, consommation en gaz naturel...) ont été directement ou facilement exprimées en fonction de l'UF, qui pour la centrale, correspond à 1 heure de fonctionnement à 100 tonnes/heure. Pour d'autres données, la conversion des mesures (concentrations volumiques des émissions à la cheminée) en flux massique par UF nécessite une méthodologie à part entière. Les analyses concernées sont celles des gaz suivants : O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, COV, ainsi que les HAP.

#### ***Calcul des flux***

Le flux d'un rejet est égal au produit de sa concentration volumique par son débit. Pour chaque constituant du mélange de rejets à l'atmosphère, le flux massique est calculé, pour l'unité fonctionnelle de 1 heure de fabrication, avec la formule générale suivante :



$$m_i = \rho_i \cdot f_i \cdot Q \cdot t$$

avec

- $m_i$  : flux massique du constituant  $i$  (kg/h)
- $\rho_i$  : masse volumique du gaz  $i$  (kg/m<sup>3</sup>),
- $f_i$  : fraction volumique mesurée (sans unité : les % ou ppm sont rapportées à 1)
- $Q$  : débit des gaz (m<sup>3</sup>/h)
- $t$  : durée (h)

La conversion nécessite deux étapes, la première consiste à calculer le débit de gaz  $Q$  dans la cheminée, et la seconde à déterminer la fraction volumique moyenne  $f_i$  de chaque gaz. La transformation des résultats de mesure pour obtenir des concentrations en unité de masse est synthétisée dans l'annexe V.1.

#### Calcul du débit volumique des gaz : $Q$

Afin de convertir les concentrations en flux, il est nécessaire de rapporter tous les volumes aux conditions normales de température (273 K) et de pression (1,025.10<sup>5</sup> Pa), appelés alors normo-mètres cubes (Nm<sup>3</sup>). En effet, pour chaque composé, la concentration volumique mesurée correspond à la fraction volumique du volume du composé recherché sur le volume du mélange gazeux. Ces volumes dépendent des conditions de service (températures supérieures à 100 °C et pressions supérieures à la pression atmosphérique).

D'autre part, deux débits doivent être calculés : le débit total (mélange gazeux), et le débit sec (mélange gazeux sans vapeur d'eau). En effet, le volume du mélange gazeux sur lequel est rapporté le volume du composé à mesurer, dépend de l'analyseur utilisé : il peut correspondre au volume des gaz circulant effectivement dans la cheminée, ou bien correspondre à un volume sec lorsque l'analyseur doit fonctionner sans humidité (voir chapitre 4, figure 4 - 3). En fonction du principe de mesure les concentrations obtenues ont été exprimées soit en unité de volume (% ou ppm) soit en unité de masse, sur volume humide ou sec.

Le débit volumique humide gazeux est calculé selon la formule suivante :

$$Q_h = S \cdot v$$

avec

- $Q_h$  : débit gazeux total aux conditions de service (m<sup>3</sup>/sec)
- $S$  : section de la cheminée (m<sup>2</sup>),
- Vitesse des gaz (m/sec)

puis est rapporté aux conditions normalisées de température et de pression :

$$Q_{h0} = Q_h \times \frac{273}{273 + T} \times \frac{P_b + P_s}{1013}$$

avec

- $Q_{h0}$  : débit gazeux total aux conditions normale (Nm<sup>3</sup>/sec)
- $T$  : température (°C)
- $P_b$  : pression atmosphérique (hPa)
- $P_s$  : pression statique (hPa)

La vitesse moyenne du gaz dans le conduit de la cheminée s'obtient en mesurant la pression dynamique, à l'aide d'un tube de Pitot à partir de la formule suivante :

$$v = \sqrt{\frac{2 \times \Delta P_{\text{dyn}}}{\rho}}$$

avec

- $v$  : vitesse des gaz (m/sec),
- $\Delta P_{\text{dyn}}$  : différence de pression dynamique des gaz (hPa),
- $\rho$  : masse volumique ( $\text{kg/m}^3$ ) du mélange gazeux dans les conditions de service

La masse volumique aux conditions de service des gaz de sortie est déterminée à l'aide des fractions volumiques des gaz prépondérants ( $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$  et  $\text{H}_2\text{O}_{\text{vap}}$ ) :

$$\rho = \sum_i \rho_i \times f_i$$

avec

- $\rho_i$  : masse volumique du composé  $i$  dans les conditions de service ( $\text{kg/m}^3$ )
- $f_i$  : fraction volumique du composé  $i$  dans les conditions de service

Pour chaque constituant, la masse volumique aux conditions de service est calculée à partir de la masse volumique aux conditions normales par la formule suivante :

$$\rho_i = \rho_i^0 \times \frac{273}{273 + T} \times \frac{P_b + P_s}{1013}$$

avec

- $\rho_i^0$  : masse volumique du composé  $i$  dans les conditions normales ( $\text{kg/Nm}^3$ )
- $T$  : température ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $P_b$  : pression atmosphérique (hPa)
- $P_s$  : pression statique (hPa)

#### *Fraction volumique moyenne : choix de la période stabilisée*

Pour permettre la détermination des flux, il est nécessaire de moyenner les fractions volumiques mesurées sur une période stabilisée, afin que la valeur utilisée soit représentative du fonctionnement de la centrale. Cette période a été choisie en fonction de la stabilité et de la valeur moyenne de la température des enrobés. La température des enrobés constitue en effet une grandeur physique spécifique du bon fonctionnement d'ensemble de la centrale.

Pour les mesures effectuées en continu, la période choisie élimine les phases les plus perturbées, c'est à dire le début et la fin de la fabrication, en éliminant 10 minutes en début et en fin de fabrication. Elle est d'environ 35 minutes. Il faut noter que pour la fabrication classique (0% de recyclage), seules sont disponibles les mesures obtenues durant 15 minutes, intégrant la fin de fabrication. Le résultat a été quand même pris en compte car la température des enrobés ne traduit pas de désordre notable, de même que les courbes d'évolution des autres paramètres mesurés. Par ailleurs, des 4 modalités réalisées, la fabrication classique est celle qui pose le moins de problèmes à reproduire ultérieurement. Les graphiques de suivis des fractions volumiques en continu sont présentés dans la chapitre 4 (figure 4 – 4).

Le Tableau 5 - 2 présente les valeurs moyennes des fractions volumiques retenues pour chaque modalité.

<b>Modalités</b>	<b>Classique</b>	<b>10%</b>	<b>20%</b>	<b>30%</b>
CO <sub>2</sub> (%)	1,8	3,0	3,2	4,1
O <sub>2</sub> (%)	17,2	14,2	15,5	13,7
COT (ppm équ. C)				
NOx (ppm)				

**Tableau 5 - 2. fractions volumiques moyennes retenues pour chaque modalité**

Dans le cas du carbone organique total (COT), le calibrage de l'analyseur étant réalisé avec du propane, les valeurs obtenues sont exprimées en équivalent propane. On admet conventionnellement (Norme NF X 43-550) l'équivalence suivante : 1 ppm équivalent propane = 1,61 mg/m<sup>3</sup> équivalent Carbone. Les valeurs ont donc été exprimées en équivalent carbone (unité masse C par m<sup>3</sup> ou par h). L'analyse en continu des COT (cf chapitre 4 figure 4 - 4) montre une dispersion beaucoup plus pour les modalités classique et avec le taux de 10%. Cette dispersion rend difficile, pour ces deux modalités, l'estimation de la valeur moyenne qui peut être le résultat d'un ensemble de données issues de plusieurs populations, consécutives à des modifications imprévues du fonctionnement de la centrale. Nous avons cependant conservé la même période de référence pour la détermination, par modalité, des valeurs moyennes. La Figure 5 - 2 montre les flux obtenus en fonction de chaque modalité.

#### *Cas particulier des HAP*

Dans le cas des HAP, la mesure n'est pas effectuée en continu mais par prélèvement isocinétique (voir chapitre 4). Dans ce cas, les valeurs mesurées sont directement exprimées en unités de masses, et aucune conversion n'est nécessaire, si ce n'est de rapporter les masses mesurées sur une durée donnée, c'est à dire à l'heure de fabrication du fait du choix de l'unité fonctionnelle.

Lorsque qu'un HAP a été quantifié dans au moins une modalité, et est détecté mais non quantifiable pour une (ou plusieurs) autre(s) modalité(s), la valeur du seuil de détection a été prise en compte pour cette (ces) autre(s) modalité(s) concernée(s). Cette méthode revient à surestimer le total obtenu, mais permet d'avoir un facteur de sécurité lorsqu'il s'agit ultérieurement d'évaluer des impacts sanitaires. Seule la fabrication classique a permis de quantifier tous les polluants pris en compte, et pour cette modalité, les flux obtenus ne sont donc pas surestimés.

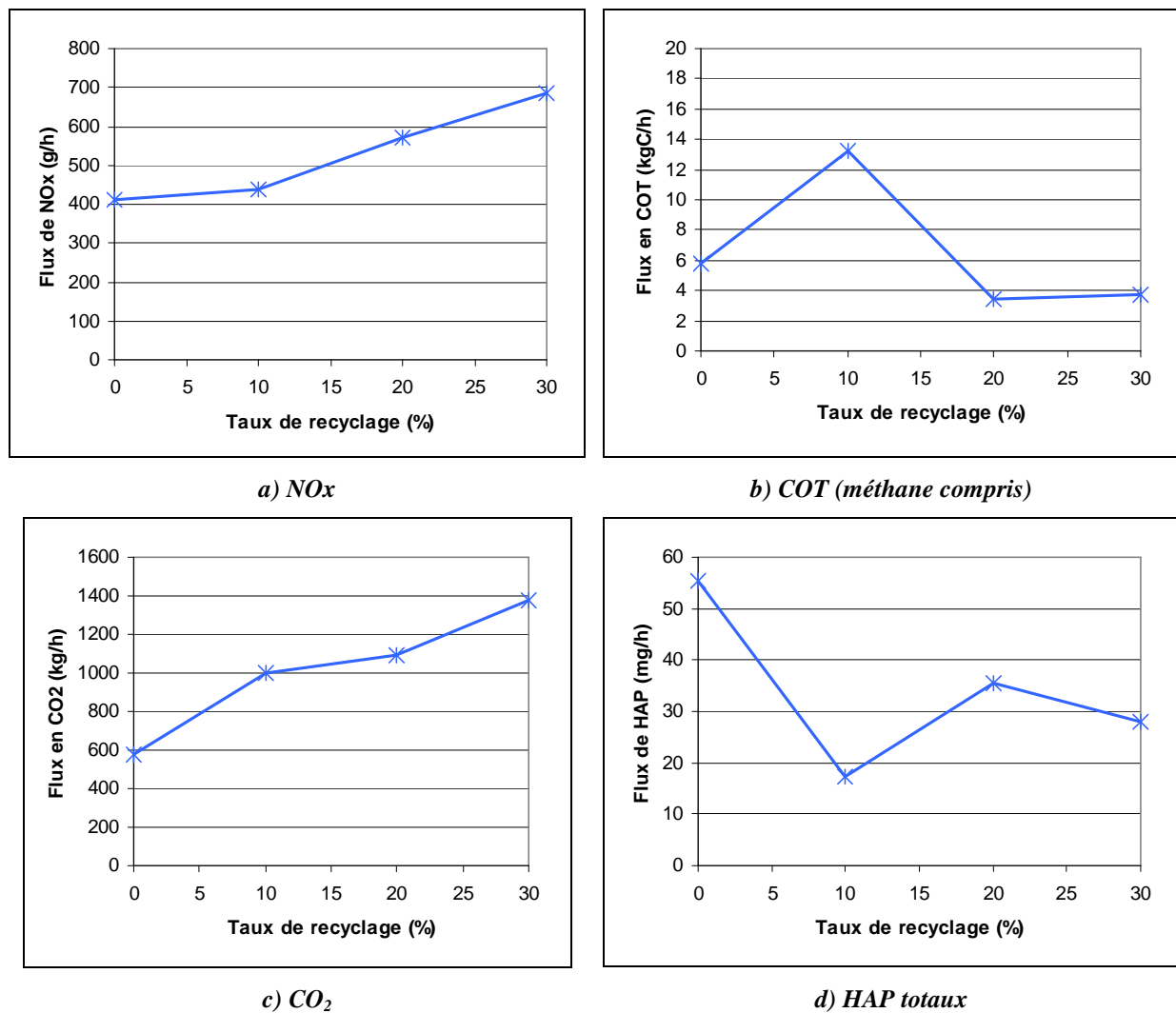
#### **Flux d'émissions à la cheminée obtenus à partir de la collecte expérimentale**

Les résultats de flux en NOx, COT, CO<sub>2</sub> et HAP sont présentés dans le Tableau 5 - 3. Les NOx et le CO<sub>2</sub> augmentent avec le taux de recyclage, tandis qu'on constate une différence pour la modalité à 10% concernant les COT et les HAP. Pour ceux-ci on constate également que la fabrication classique produit des gaz plus chargés en HAP que les autres fabrications. Enfin, le benzo(a)pyrène, considéré comme le plus toxique des HAP, n'est décelé dans aucune des quatre fabrications étudiées.

Emissions à la cheminée	Modalités				
	Classique 0%	Taux de 10%	Taux de 20%	Taux de 30%	
CO <sub>2</sub> (kg/h)	579	1000	1093	1378	
COT (kg/h)	5,8	13,2	3,4	3,7	
NOx (g/h)	410	438	572	686	
HAP (mg/h)	Phénanthrène	5,4	5,6	6,6	8,5
	Pyrène	22,4	2,7*	11,8	5,5
	Benzo(a)anthracène	7,8	2,7*	3,5*	3,7*
	Chrysène	7,3	2,7*	3,5*	3,7*
	Fluoranthène	12,5	3,7	10,4	6,6
	<b>TOTAL HAP</b>	<b>55,4</b>	<b>17,4</b>	<b>35,8</b>	<b>28,0</b>

**Tableau 5 - 3. Flux horaires des émissions gazeuses**  
\* : correspond à la limite de détection

On peut observer l'évolution des flux en fonction du taux de recyclage sur la Figure 5 - 2.



**Figure 5 - 2. Flux horaire des émissions polluantes dans les rejets gazeux à la cheminée**

### Flux consommés et émis par la centrale d'enrobage

Les valeurs obtenues pour le procédé centrale d'enrobage, pour l'inventaire de cycle de vie, sont présentées dans le Tableau 5 - 4. Les volumes de gaz naturel consommés ont été convertis en unité d'énergie à partir du pouvoir calorifique du gaz naturel (36 MJ/Nm<sup>3</sup>).

Pour compléter les mesures présentées dans le chapitre 4, les émissions de particules solides et de CO, ainsi que l'énergie électrique sont issues de la littérature STRIPPLE [2001]. En effet, d'une part les mesures réalisées sur les particules ont permis de contrôler un seuil sans toutefois fournir une masse, d'autre part, les mesures sur le compteur électrique de la centrale sont entâchées d'une incertitude concernant les relevés, et enfin, le CO n'a pas été mesuré. Cependant, l'utilisation de ces données bibliographiques amène plusieurs remarques :

- la comparaison de l'énergie électrique consommée montre que les valeurs collectées expérimentalement, même entâchées d'incertitude, sont très inférieures aux valeurs de la littérature. On ne connaît pas l'origine des données bibliographiques, mais il est possible qu'elles concernent des procédés différents, et également qu'elles incluent une consommation non liée au procédé (bâtiments administratifs par exemple) ;
- les données trouvées sont exprimées en fonction de la tonne d'enrobé produit et ne sont donc pas ajustées en fonction du taux de recyclage, ce qui implique des valeurs identiques pour toutes les modalités.

Source	Flux	Modalités	Classique	10%	20%	30%
Collecte expérimentale	Emissions	CO <sub>2</sub> (kg)	579	1000	1093	1378
		COT (kg)	5,8	13,2	3,4	3,7
		NOx (g)	410	438	572	686
		HAP totaux (mg)	55,4	17,4	35,8	28,0
	Consommations	Gaz naturel (MJ)	21 024	24 120	21 384	21 240
		Energie électrique (MJ)	504	576	504	504
		Fraisats (t)	0	9,6	18,9	28,6
		Bitume (t)	5,22	4,64	4,13	3,65
		Granulats naturels (t)	94,8	85,7	77,0	67,6
		Déchets	Refus de fabrication (tonnes)	4	4	4
Stripple 2001	Emissions	CO (g)	371	371	371	371
		Particules (g)	285	285	285	285
	Consommations	Energie électrique (MJ)	3600	3600	3600	3600

**Tableau 5 - 4. Inventaire des flux liés à la fabrication des enrobés pour une heure de fabrication à une cadence de 100 tonnes/heure (UF)**

### Discussion

#### Analyse de la combustion

Dans le cas d'une combustion complète avec excès d'air, les fractions volumiques des rejets gazeux secs en CO<sub>2</sub> et O<sub>2</sub> sont théoriquement liés par la relation linéaire de Grebel [Institut Français de l'Énergie, 1982]:

$$\gamma_0 = \frac{0,21 \cdot \gamma}{0,21 - \omega}$$

*Avec*

- $\gamma_0$  = teneur maximale en  $CO_2$  des rejets gazeux secs pour une combustion complète
- $\gamma$  = teneur en  $CO_2$  mesurée sur rejets secs
- $\omega$  = teneur en  $O_2$  mesurée sur rejets secs

Dans le cas d'une combustion incomplète avec excès d'air, la relation précédente n'est plus applicable, car une part du volume d'air nécessaire à la combustion n'est pas utilisée et joue le rôle de facteur de dilution, comme l'air en excès. La combustion comporte alors des imbrûlés, par exemple du méthane lorsque le gaz naturel est utilisé comme combustible.

Le Tableau 5 - 5 regroupe les valeurs de  $CO_2$  mesurées et calculées avec la relation de Grebel, montrant les différences liées à la présence probable d'imbrûlés. On constate que la relation de Grebel s'applique parfaitement aux formules à 20% et 30% de recyclage, ce qui signifie que la combustion est complète pour ces deux modalités. Par contre, les modalités classique et 10% de recyclage ne remplissent pas cette condition. Ceci laisse penser que la combustion est incomplète. Cette supposition est renforcée par les teneurs élevées en COT obtenues pour ces deux modalités (Tableau 5 - 4). Même si une partie des COT peut provenir du bitume, la quantité globale de bitume est similaire pour toutes les modalités et ne permet pas d'expliquer la différence constatée. On peut donc penser qu'ils proviennent d'imbrûlés. Il faut noter que ces deux fabrications se sont déroulées en présence de pluie, à laquelle le tambour, et l'ensemble du matériel (trémies, bandes...) est exposé. En effet, la pluie est susceptible de modifier la quantité d'énergie nécessaire au séchage des granulats, et donc de modifier les paramètres de combustion. Dans les deux cas, la consommation en gaz naturel est d'ailleurs nettement supérieure.

Modalité	$O_2$ mesuré %	$CO_2$ mesuré %	$CO_2$ calculé %
Classique	17,2	1,8	2,2
Taux de 10%	14,2	3	3,9
Taux de 20%	15,5	3,2	3,2
Taux de 30%	13,7	4,1	4,2

**Tableau 5 - 5. Valeurs de  $O_2$  mesurées et de  $CO_2$  mesurées et calculées**

#### *Aspects réglementaires*

La synthèse des mesures et des valeurs réglementaires en vigueur à la date de l'expérimentation, sont présentées dans le Tableau 5 - 6. Les textes réglementaires ne prévoient pas de rapporter les concentrations à un pourcentage d'oxygène donné, alors que l'on constate par ailleurs que les concentrations volumiques en oxygène peuvent varier considérablement (Tableau 5 - 5). Les concentrations mentionnées dans le Tableau 5 - 6 sont les valeurs obtenues dans les conditions réelles de l'expérimentation et non rapportées à un taux d'oxygène donné. Ceci rend donc les comparaisons difficiles, car les concentrations mesurées peuvent diminuer artificiellement par dilution en présence importante d'oxygène, comme c'est spécifiquement le cas dans le procédé centrale d'enrobage.

	Poussières	NOx		COV <sup>(1)</sup>		HAP <sup>(2)</sup>	
	totales mg/Nm <sup>3</sup>	Concentration mg/Nm <sup>3</sup>	Flux kg/h	Concentration mgC/Nm <sup>3</sup>	Flux kg/h	Concentration µg/Nm <sup>3</sup>	Flux mg/h
Arrêté 1998	< 100	≤ 500	Si > 25	≤ 110 <sup>(2)</sup>	Si > 2		< 500 <sup>(3)</sup>
Classique	< 50	25,2	0,41	356	5,8	3,4	55,4
Avec 10%	< 50	26,0	0,44	800	13,2	1	17,4
Avec 20%	< 50	33,1	0,57	198	3,4	2,17	35,6
Avec 30%	< 50	41,3	0,69	222	3,7	1,7	28

**Tableau 5 - 6. Comparaisons des mesures de concentrations aux valeurs réglementaires**

1. Les COV fixés dans l'arrêté sont des COVNM et ceux mesurés sont des COT
2. PIERRE : ICI C'ETAIT VIDE, A COMPLETER
3. Dans l'annexe IV.a de l'arrêté de 1998, seuls deux HAP figurent dans ceux la liste EPA.
4. Le flux horaire est fixé par substance citée dans l'arrêté de 1998.

**Poussières :** Les émissions de poussières totales ne posent pas de problème vis à vis du seuil maximum fixé par l'arrêté de 1998. Ceci est logique dans la mesure où cette pollution a toujours été prise en compte, entraînant les constructeurs à faire évoluer le matériel en fonction de l'évolution de la réglementation sur l'émission de ces poussières. Il faut noter que l'appréciation de l'impact environnemental s'effectue en fonction du diamètre des poussières alors que les valeurs de référence sont fondées sur la mesure des poussières de diamètre inférieur à 10µm (PM 10) et que pour la réglementation sur les émissions à l'atmosphère, seule la quantité totale (concentration ou flux) est prise en compte. Ainsi un seuil limite à 100 mg/Nm<sup>3</sup> ne renseigne pas sur la quantité de PM10.

**NOx :** Les émissions d'oxyde d'azote sont très en dessous des valeurs réglementaires. Même en prenant les valeurs maximales obtenues sur l'ensemble des mesures, le flux reste inférieur de 10 à 20 fois au seuil fixé.

**COV :** La valeur seuil réglementaire des COV concerne des composés dont la volatilité est effective à 20°C (tension de vapeur seuil de 0,01kPa) hors méthane (COVNM). Les composés organiques analysés sont des composés organiques totaux (COT, CH<sub>4</sub> compris) volatils à la température de mesure, qui est dans le cas de la centrale, supérieure à 100 °C. Il n'existe pas de loi physique permettant de rapporter cette valeur à la température de 20°C correspondant à la définition. La confrontation entre les valeurs collectées et réglementaires, s'avère donc difficile.

**HAP :** Bien que les HAP cités dans l'arrêté ne soient pas ceux figurant comme toxiques reconnus sur la liste EPA, on peut constater que les valeurs mesurées sont inférieures au seuil donné.

#### *Analyse des résultats de flux*

Les résultats obtenus dans le Tableau 5 - 4, ne montrent pas tous des tendances claires en fonction du taux de recyclage.

**COT :** on observe une augmentation importante pour la modalité à 10% de recyclés, et la discussion précédente amène à supposer une influence des paramètres de combustion et de fonctionnement du brûleur. La prise en compte du méthane dans la quantification des COT constitue un élément important ; seule sa mesure séparée aurait peut-être permis de vérifier la présence d'imbrûlés.

*HAP* : on constate une diminution du flux massique total pour la modalité à 10%. Les HAP peuvent à la fois provenir de la combustion incomplète du combustible, et du chauffage des liants (ancien et d'apport), mais il n'est pas possible de faire la part de leurs contributions respectives. Dans ce cas précis d'étude, le fait d'obtenir plus de HAP pour la fabrication classique tend à démontrer que le liant ancien n'est pas un facteur aggravant d'émission de HAP. Il faut cependant remarquer que l'étude se situe dans un cas particulier de recyclage. En effet, pour l'expérimentation, les caractéristiques du liant ancien (Pénétrabilité, Température Bille et Anneau) ont permis d'utiliser un liant d'apport identique pour les quatre modalités, sans nécessité d'ajouter de fluxant, dont la présence aurait également pu modifier la composition en HAP.

Les liens entre émissions et taux de recyclage ne sont donc pas établis, et l'on peut supposer que les émissions gazeuses ne sont pas forcément directement liées à la quantité de bitume (neuf ou ancien) utilisée. Il est également possible que le recyclage, puisqu'il implique l'introduction de fraisats au milieu du tambour, modifie considérablement les conditions d'émissions, et soit considéré comme un procédé à part entière, sans lien direct avec le procédé sans recyclage.

Les émissions des centrales d'enrobage obtenues pour cet inventaire ne sont donc pas généralisables, et une étude plus poussée du procédé reste à faire pour mieux comprendre leur origine et adapter les données d'inventaire aussi bien aux paramètres de fonctionnement du procédé qu'aux matériaux bitumineux produits.

### **5.2.3. Chantier de déconstruction : procédé de production des fraisats**

Comme détaillé dans le chapitre 4, le chantier de déconstruction de la section de chaussée étudiée, s'est déroulé sans distinction entre les quatre planches, pour des raisons de rapidité liées à la sécurité routière d'un chantier réalisé sous trafic. Afin d'obtenir des données d'inventaire pour ce procédé correspondant à l'unité fonctionnelle de l'étude (voir Tableau 5 - 1), il faut donc élaborer un scénario distinguant le fonctionnement des engins de fraisage et de balayage pour chaque modalité de recyclage.

#### ***Scénario de fraisage***

Un déroulement hypothétique des travaux de fraisage et de balayage a été élaboré en supposant que chaque planche était réalisée séparément des autres d'une part, et que la priorité a été donnée à la rapidité du chantier (au détriment de l'usure du matériel par exemple). Ainsi, la vitesse de fraisage lente (9,2 m/min) a été adoptée uniquement pour déconstruire la partie de la couche de liaison nécessaire à l'obtention de la masse de fraisats de « classe a » correspondant au taux de recyclage propre à chaque planche. La vitesse de fraisage la plus rapide (31 m/min) a été choisie dans tous les autres cas : fraisage de la couche de roulement ou fraisage simultané des couches de roulement et de liaison.

La masse de fraisats de "classe a" obtenus pour le recyclage dans la centrale est ainsi conditionnée par trois facteurs : l'homogénéité du matériau qui implique de ne fraiser que la couche de liaison, la vitesse de fraisage qui est obligatoirement à 9,2 m/min, et la largeur de la bande fraisée (2 bandes de 1,5 m dont une en rive, et une bande de 0,8 m).

Un scénario a donc été construit de la manière suivante :



- la quantité de fraisats de « classe a » nécessaire détermine le nombre de bandes de la couche de liaison à fraiser à 9,2 m/min (il a été supposé que la fraiseuse ne changeait de vitesse qu'après avoir terminé une bande),
- le reste des bandes est fraisé à 31 m/min pour réduire la durée du fraisage au minimum,
- la bande en rive n'est jamais utilisée pour le recyclage étant donné les irrégularités d'épaisseurs des couches de liaison et de roulement dues à des travaux d'entretien antérieurs.

On obtient le scénario détaillé dans le Tableau 5 - 7.

N° Bande	Largeur (m)	couche type	épaisseur (cm)	Taux de recyclage			
				0 %	10 %	20 %	30 %
1 (en rive)	1,5	Roulement	3	31	31	31	31
		Liaison	4				
2	1,5	Roulement	3	31	31	31	31
		Liaison	4				
3	0,8	Roulement	3	31	31	31	31
		Liaison	4				

**Tableau 5 - 7. scénario de fraisage (m/min) par taux de recyclage**  
*Une seule vitesse pour deux couches indique qu'elles ont été fraisées simultanément.*

### **Scénario de balayage**

Après le passage de la fraiseuse, le scénario choisi considère que la balayeuse, également de largeur 1,5 m, effectue deux passes sur le fond de couche de chaque bande, soit 6 passes par planche.

### **Résultats d'inventaire**

#### *Consommations liées au procédé élémentaire de fraisage*

La fraiseuse consomme de l'eau destinée à lubrifier et à refroidir le tambour, et du carburant. Les émissions prises en compte sont celles du moteur et ont été calculées à partir de la consommation en carburant. Comme expliqué dans le chapitre 4, seules les consommations totales en eau et en carburant ont été mesurées. Les valeurs de consommations destinées à l'inventaire ont été calculées à partir des valeurs relevées totales, en se basant sur l'approximation que la consommation est proportionnelles à la durée de fraisage. De fait, il est probable qu'à des épaisseurs différentes, la fraiseuse développe des puissances différentes, ce qui implique des consommations différentes. En l'état actuel des connaissances sur ce sujet et des mesures disponibles sur le chantier RN76, la prise en compte du paramètre épaisseur lors de la déconstruction, n'est pas possible.

Pour le scénario de fraisage présenté précédemment, les durées de fonctionnement ont été calculés, ainsi que les consommations correspondantes. Les résultats sont présentés dans le Tableau 5 - 8.

N° Bande	Largeur (m)	couche type épaisseur (cm)	Taux de recyclage			
			0 %	10 %	20 %	30 %
Nombre de passes		Fraisage à 31 m/min	3	3	3	3
		Fraisage à 9,2 m/min	0	1	1	2
Surface fraisée (m <sup>2</sup> )		Fraisage à 31 m/min	570	570	570	570
		Fraisage à 9,2 m/min	0	120	225	345
Durée du fraisage (min)		Fraisage à 31 m/min	14,5	14,5	14,5	14,5
		Fraisage à 9,2 m/min	0	16,3	16,3	32,6
Consommations		Eau (L)	317	675	675	1 032
		Gasoil (L)	18,2	37,8	37,8	59,2

**Tableau 5 - 8. Consommations de la fraiseuse par planche de 150 x 3,8 m<sup>2</sup> (UF)**

#### *Consommations et déchets liés au procédé élémentaire de balayage*

La balayeuse récupère les balayures produites lors du fraisage. Elle consomme de l'eau et du carburant pour ses deux moteurs : le moteur utilisé pour le déplacement et le moteur auxiliaire utilisé pour actionner la rotation des balais.

Pendant son fonctionnement sur chantier, les consommations totales ainsi que la masse totale des balayures ont été relevées.

En accord avec le scénario de balayage défini, les consommations ont été affectées de manière identique pour chaque planche. Les balayures ont été affectées de manière proportionnelle à la surface rabotée par la fraiseuse. Les résultats sont présentés dans le Tableau 5 - 9. Les consommations en gasoil et eau sont donc identiques quelque soit le taux de recyclage. Seule la quantité de balayures diffère pour chaque planche, car la surface fraisée à 9,2 m/mn est différente.

N° Bande	Largeur (m)	couche type épaisseur (cm)	Taux de recyclage			
			0 %	10 %	20 %	30 %
Nombre de passes		Fraisage à 31 m/min	3	3	3	3
		Fraisage à 9,2 m/min	0	1	1	2
Surface fraisée (m <sup>2</sup> )		Fraisage à 31 m/min	570	570	570	570
		Fraisage à 9,2 m/min	0	120	225	345
Balayures (tonnes)		Fraisage à 31 m/min	4,2	4,2	4,2	4,2
		Fraisage à 9,2 m/min	0	0,9	1,7	2,5
Consommations		Eau (L)	500	500	500	500
		Gasoil moteur principal (L)	6,25	6,25	6,25	6,25
		Gasoil moteur auxiliaire (L)	10	10	10	10

**Tableau 5 - 9. Consommations et déchets de la balayeuse par planche de 150 x 3,8 m<sup>2</sup> (UF).**

#### *Emissions des moteurs de fraiseuse et de balayeuse*

Ne disposant pas d'informations sur la consommation et les émissions des moteurs des engins de chantier, ceux-ci ont été assimilés à ceux de camions fonctionnant en milieu urbain, comme détaillé dans le Tableau 5 - 10.

En fonction des données de consommation, les émissions des moteurs de la fraiseuse et de la balayeuse ont été calculées à partir de données bibliographiques. Cette méthode est expliquée plus loin, dans la partie concernant les consommations et émissions des transports (voir § 5.3.2 p. 136).

Engin	Moteur assimilé à celui d'un :
Fraiseuse	Semi-remorque
Balayeuse	Semi-remorque

**Tableau 5 - 10. Hypothèses moteurs pour la fraiseuse et la balayeuse**

*Bilan d'inventaire du chantier de déconstruction*

Les émissions et consommations du fraisage et du balayage sont regroupées dans le Tableau 5 - 11. Les masses de fraisats ont été calculées en utilisant une masse volumique de 2,4 t/m<sup>3</sup> qui correspond à la masse volumique réelle de l'enrobé en place (2,62 t/m<sup>3</sup>) multipliée par la compacité (0,93).

Taux de recyclage		0 %	10 %	20 %	30 %
Flux entrants	Gasoil	34,6	55,1	55,1	75,6
Consommations (kg)	Eau	918	1275	1275	1632
	Acier	0,200	0,420	0,420	0,650
Flux sortants	Matériaux (tonnes)				
	Fraisats « classe a »	0	11,5	21,6	33,1
Emissions (g)	Fraisats « classe b »	91,6	80,0	70,0	58,5
	Balayures	4,2	5,1	5,8	6,7
Emissions (g)	Particules	148	235	235	323
	CO	782	1243	1243	1708
	COV	273	435	435	597
	NOx	1560	2484	2484	3409
	CO <sub>2</sub>	108 544	172 856	172 856	237 168

**Tableau 5 - 11. Flux des procédés élémentaires de fraisage et balayage par planche de 150 x 3,8 m<sup>2</sup> (UF)**

On constate que les émissions et consommations engendrées par le conditionnement de la quantité de fraisats nécessaires aux fabrications d'enrobés augmentent avec le taux de recyclage car la durée de fonctionnement de la fraiseuse augmente pour produire les fraisats de « classe a », sauf pour les cas 10% et 20% qui sont identiques. Ceci s'explique par le fait que le nombre de passes produisant des fraisats de « classe a » est identique pour ces deux taux, du fait du scénario de fraisage choisi (Tableau 5 - 7). Seule la masse de balayures produite diffère entre les planches à 10% et 20% car la surface fraisée à 9,2 m/mn est différente (voir Tableau 5 - 9).

Il faut noter que les capacités des réservoirs des engins (eau et gasoil) sont des facteurs importants qui pourraient intervenir dans le cas d'inventaires appliqués à des longueurs de chaussées plus importantes. En effet, les capacités conditionnent les arrêts et nécessite éventuellement des kilomètres supplémentaires pour le réapprovisionnement.

## 5.2.4. Chantier de reconstruction : procédé de production de la couche de liaison

### *Méthodes de calcul des flux*

Contrairement aux cas de la fraiseuse et de la balayeuse, dans le cas de la mise en œuvre, la collecte des données environnementales s'est faite : soit séparément pour chaque planche, soit globalement sans qu'il n'existe pas de différence de fonctionnement des engins entre les planches. Ainsi, l'élaboration de scénario n'est pas nécessaire pour exploiter les données brutes relevées lors de la mise en œuvre.

#### *Répandeuse*

Les modalités de dépôt de la couche d'accrochage sont identiques pour tous les taux de recyclage considérés : la répandeuse dépose la couche d'accrochage (300 g de bitume résiduel par m<sup>2</sup>) en une seule passe sur l'ensemble des 3 bandes. La spécificité de l'enduit d'étanchéité pour les capteurs de récupération de l'eau n'est pas prise en compte. Les consommations en gasoil, en eau, en propane et en bitume sont donc les mêmes pour toutes les planches, et les consommations totales mesurées ont été divisées par 4.

#### *Finisseur*

Le finisseur a déposé environ 95 tonnes d'enrobé bitumineux en une seule passe par planche, avec un dosage de 160 kg/m<sup>2</sup> et une vitesse d'avancement de l'ordre de 6 m/min. La modalité de dépôt de l'enrobé étant la même pour toutes les planches, les consommations sont identiques.

#### *Compacteurs*

L'atelier de compactage comportait un compacteur à pneus et un compacteur vibrant. Ne pouvant réaliser des planches de référence pour chaque taux de recyclage (voir chapitre 3), le compactage a été adapté en temps réel et les durées ont été mesurées pour chaque planche. En effet, les deux compacteurs ont fonctionné différemment pour chaque planche, principalement en raison des différences de maniabilité des enrobés constatées lorsque le taux de recyclage augmente.

### *Résultats d'inventaire*

Ne disposant pas d'informations sur la consommation et les émissions des moteurs des engins de chantier, ceux-ci ont été assimilés à ceux de camions fonctionnant en milieu urbain, comme détaillé dans le Tableau 5 - 12.

<b>Engin</b>	<b>Moteur assimilé à celui d'un :</b>
Répandeuse	Six-roues
Finisseur	Semi-remorque
Compacteur	Semi-remorque

**Tableau 5 - 12. Hypothèses moteurs pour la mise en œuvre**

Comme pour la fraiseuse et la balayeuse, les émissions des moteurs ont été calculées en fonction des données de consommation, à partir de données

bibliographiques. Cette méthode est expliquée plus loin, dans la partie concernant les consommations et émissions des transports (voir § 5.3.2).

Les émissions causées par la combustion du propane qui a lieu lors de l'utilisation de la répandeuse et du finisseur, ont été négligées. Le Tableau 5 - 13 regroupe l'ensemble des flux d'inventaire du procédé de mise en œuvre, détaillé par procédé élémentaire.

	Flux	Engins	0%	10%	20%	30%
Consommations	Gasoil	Répandeuse	0,7	0,7	0,7	0,7
		Finisseur	21	21	21	21
		Compacteurs	8,4	7,3	5,9	6,4
	Propane	Répandeuse	0,1	0,1	0,1	0,1
		Finisseur	13,1	13,1	13,1	13,1
	matériaux	Eau	Compacteurs	164	143	102
Bitume		Répandeuse	0,175	0,175	0,175	0,175
		Enrobé	Finisseur	94,8	94,8	94,8
Emissions	Particules	Répandeuse	3	3	3	3
		Finisseur	89	89	89	89
		Compacteurs	36	31	25	28
	CO	Répandeuse	27	27	27	27
		Finisseur	473	473	473	473
		Compacteurs	189	165	133	146
	COV	Répandeuse	3	3	3	3
		Finisseur	165	165	165	165
		Compacteurs	66	58	46	51
	NOx	Répandeuse	27	27	27	27
		Finisseur	945	945	945	945
		Compacteurs	378	329	265	291
	CO <sub>2</sub>	Répandeuse	2191	2191	2191	2191
		Finisseur	65 741	65 741	65 741	65 741
		Compacteurs	26 296	22 878	18 408	20 248

*Tableau 5 - 13. flux du procédé de mise en œuvre par planche de 150 x 3,8 m<sup>2</sup> (UF)*

On constate que les flux sont identiques concernant la répandeuse et le finisseur. Les consommations des compacteurs diminuent en fonction du taux de recyclage exception faite pour le compacteur à pneu pour la modalité 30%. Dans ce cas précis, la durée de compactage a été augmentée en raison de la persistance d'ondulations sur la chaussée.

#### **5.2.5. Chantier de construction : émissions gazeuses diffuses des enrobés**

Les émissions gazeuses diffuses ont été mesurés à partir d'une chambre à flux réalisée sur un modèle réduit ou mini-planche, et qui est détaillé dans le chapitre 4. Les rejets mesurés sont les COT, les HAP ainsi que les odeurs. Le passage des émissions mesurées sur mini-planche aux données d'inventaire conformes à l'unité fonctionnelle nécessite la prise en compte d'un changement d'échelle qui est expliqué ici.

### **Méthode de conversion des mini-panches à l'unité fonctionnelle**

La couche d'enrobé répandue sur la chaussée se présente comme une Source Surfactive Passive dont la température de départ est de l'ordre de 150°C, et décroît en fonction du temps. Les mini-panches d'enrobés ont été réalisées afin de simuler une source surfactive passive.

On considère que les émissions récupérées pendant la durée de prélèvement correspondent aux émissions totales émises par la mini-planche. En effet, le suivi en continu des COT montre une courbe en cloche en fonction du temps (voir chapitre 4 figure 4 - 6), avec une augmentation de la concentration dans la chambre à flux, provoquée le confinement de la mini-planche, puis une diminution liée à la baisse de température. Après 50 minutes, une ventilation forcée est réalisée, destinée à collecter le restant des émissions. Cette période correspond bien à des émissions faibles, et l'on considère que la plus grande part des émissions de COT a été mesurée. Cette observation concernant les COT a été supposée s'appliquer au prélèvement des HAP et des odeurs.

D'autre part, l'évolution de la température des mini-panches en fonction du temps est considérée représentative de celle de la section de route étudiée. Ainsi les émissions de chaque mini-planche ont été considérées comme proportionnelles à la surface de la mini-planche (0,48 m<sup>2</sup>) et ramenées à la surface de planche correspondant l'unité fonctionnelle (150 m x 3,8 m = 570 m<sup>2</sup>). Afin d'obtenir les flux d'inventaire :

- les concentrations masse sur volume suivies en continu des COT (chapitre 4 figure 4 – 6) ont été intégrées en fonction du temps, le résultat a été rapporté au volume de prélèvement (0,33 Nm<sup>3</sup>) et à la surface de la section étudiée (unité fonctionnelle – 570 m<sup>2</sup>) ;
- les concentrations masse sur volume en HAP obtenues directement de par le principe de mesure, ont été ramenées au volume de prélèvement (0,33 Nm<sup>3</sup>) et à la surface de la section étudiée (unité fonctionnelle – 570 m<sup>2</sup>). Lorsque qu'un HAP a été détecté au-dessous de la limite de quantification, sa concentration a été comptabilisée à la valeur de la limite de détection de l'analyseur. Cette hypothèse, bien que discutable, permet d'avoir une surestimation des flux, sans affecter le classement des différentes modalités entre elles.

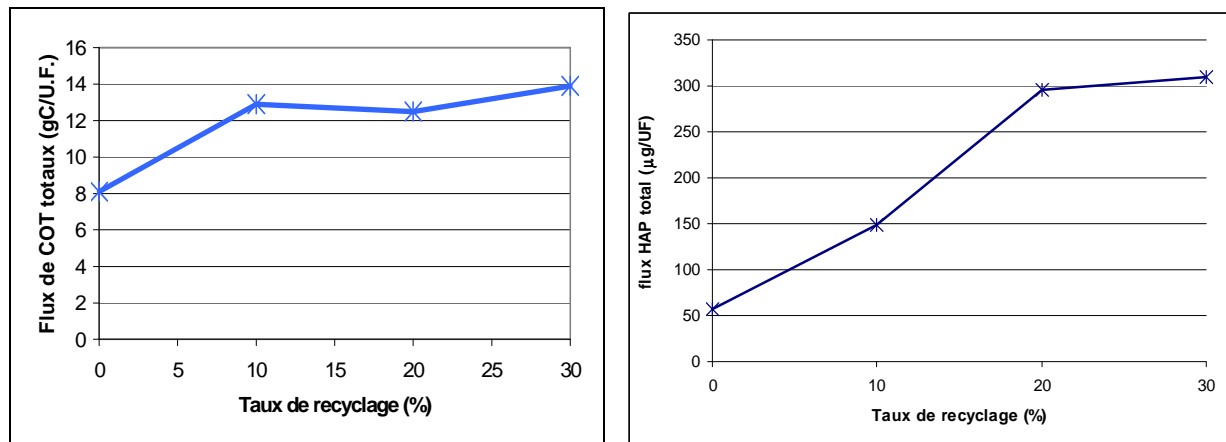
### **Résultats des flux émis par l'enrobé chaud en place**

Les résultats des flux de l'inventaire (COT, HAP par molécule et totaux) sont présentés dans le Tableau 5 - 13.

Enrobé	Benzo(a)anthracène (µg)	Chrysène (µg)	Benzo(b)fluoranthène (µg)	HAP totaux (µg)	COT (éq C)
Classique	17,1*	22,8	17,1*	<b>57,0</b>	8,1
Avec 10%	17,1*	62,7	68,4	<b>148,2</b>	12,9
Avec 20%	74,1	159,6	62,7	<b>296,4</b>	12,5
Avec 30%	68,4	162,0	79,8	<b>310,2</b>	13,9

**Tableau 4- 1 : flux des HAP détectés dans les rejets gazeux et somme de ces HAP par planche de 150 x 3,8 m<sup>2</sup> (UF) -\*valeur correspondant à la limite de détection**

La représentation graphique des émissions de COT et HAP totaux en fonction du taux de recyclage est présentée sur la Figure 5 - 3.



a) flux de COT

b) flux de HAP totaux

**Figure 5 - 3. flux des émissions à la mise en œuvre des enrobés chauds par section étudiée (UF)**

**COT** : les résultats montrent que les COT émis lors de la mise en œuvre de l'enrobé chaud sont moins élevés lorsqu'il n'y a pas de recyclage, et que la tendance est globalement à l'augmentation avec le taux de recyclage.

**HAP** : ils augmentent également avec le taux de recyclage, et sont des composés plus lourds que ceux détectés à la centrale.

Pour les COT et les HAP totaux, les tendances obtenus au niveau de la mise en œuvre varient de façon inverse à ceux obtenus à la centrale. Dans l'état actuel des connaissances, il n'est pas possible d'expliquer précisément cette différence. Notons toutefois les facteurs suivants, qui constituent des éléments potentiels d'explication :

- pour la fabrication en centrale, les COT proviennent à la fois de la combustion du gaz naturel et des liants (liant ancien des agrégats et liant d'apport),
- à la mise en œuvre les COT proviennent exclusivement du liant total (mélange liant ancien et liant d'apport) soumis à une décroissance de température.

La fabrication et la mise en œuvre constituent donc deux problématiques différentes. Au stade des connaissances apportées par l'étude, en sachant que toutes les fabrications d'enrobés ont été réalisées avec le même liant d'apport et avec la supposition que les évolutions de température soient identiques, il semble que les émissions diffuses produites par la couche d'enrobés chauds sont plus liées à la présence du liant ancien (puisque seule la teneur de ce paramètre suit l'évolution du flux de COT), qu'à celle du liant d'apport.

### 5.3. INVENTAIRE DES TRANSPORTS

Aucune collecte expérimentale n'a été réalisée concernant les transports. A partir des éléments d'organisation du chantier, les flux consommés et émis par les transports ont été calculés à partir des masses transportées et de données bibliographiques, en élaborant un scénario. Celui-ci se base sur l'ensemble des transports répertoriés entre les différents lieux du système (lieux de stockage, lieux de production) comme représenté sur la Figure 5 - 1.

#### 5.3.1. Elaboration du scénario de transport

Tous les transports intégrés dans cet inventaire ont été considérés comme réalisés par la route, même si le Parc routier de Blois est en réalité approvisionné en granulats par voie ferrée, car l'évaluation de ce mode de transport nécessite une investigation à part entière, et a été écartée de cette étude. Les transports concernent deux types de marchandises : les engins et les matériaux.

*Engins* : pour évaluer les consommations dues au transport des engins, on considère que les porte-chars nécessaires au transport du finisseur et des compacteurs sont garés à la centrale avant le chantier, qu'ils attendent sur place, puis ramènent les engins à la fin du chantier. La fraiseuse a été acheminée par porte-char de la ville de Nantes jusqu'au site du chantier. Son transport aller-retour a été pris en compte sur cette distance en considérant le chemin le plus rapide, par autoroute selon la base de données [viaMichelin, 2003] (voir détails de l'itinéraire en annexe 5-1). La répandeuse et la balayeuse n'ont pas été acheminées par porte-char, elles ont circulé sur route.

*Matériaux* : le terme matériaux englobe les fraisats d'enrobés (de classe a et c), les balayures dues au fraisage de la chaussée, le bitume, les granulats naturels et les enrobés. Les camions effectuant le transport des matériaux ont servi à l'ensemble des quatre planches. Pour ramener leurs consommations et émissions à l'unité fonctionnelle, on considère chaque planche séparément, avec les hypothèses suivantes :

- les camions acheminant les matériaux provenant ou arrivant sur le chantier sont tous garés à la centrale avant le chantier et y retournent en fin de chantier,
- les camions retournent à vide à leur point de départ après avoir déposé les matériaux,
- les balayures sont transportées par la balayeuse jusqu'à un site de dépôt temporaire situé à proximité du chantier.

Les camions nécessaires au transport des fraisats de « classe a » arrivent vides sur le chantier et repartent pleins vers la centrale. Les camions nécessaires au transport des fraisats de « classe c » arrivent vides sur le chantier et repartent pleins vers le site de dépôt temporaire où ils déposent leur chargement. Ils retournent ensuite à vide à la centrale via le chantier. Les balayures sont transportées directement par la balayeuse sur le site du dépôt temporaire. La balayeuse revient à vide sur le chantier. Le bitume vient de la raffinerie Shell de Petit Couronne (76) et y retournent à vide. Les granulats naturels sont considérés comme acheminés par route de la carrière de La Noubleau Saint-Varent (79), et y retournent à vide. Les camions déposent l'enrobé nécessaire à la reconstruction puis retournent à vide à la centrale.



Les différentes phases de transport, en relation avec les sites associés aux différents procédés, ainsi que les distances, ont été regroupées dans le Tableau 5 - 14. Parmi les données sur les émissions des moteurs consultées lors de l'étude bibliographique, on retient celles relatives au transport en milieu rural pour caractériser les transports entre le chantier et la centrale d'enrobage ainsi que le fonctionnement des engins de chantier. Les transports de la fraiseuse, du liant bitumineux et des granulats naturels, ont été considérés comme réalisés en partie en milieu rural et en partie sur autoroute.

Description	Trajet	Distance (km)		
		rural	autoroute	total
Transport matériaux				
A vide matériaux « classe a »	Centrale - Chantier	56	0	56
R plein matériaux « classe a »	Chantier - Centrale	56	0	56
A vide matériaux « classe b »	Centrale - Chantier	56	0	56
A plein matériaux « classe b »	Chantier - Dépôt	3,1	0	3,1
R vide matériaux « classe b »	Dépôt - Chantier	3,1	0	3,1
R vide matériaux « classe b »	Chantier - Centrale	56	0	56
A plein balayeuse	Chantier - Dépôt	3,1	0	3,1
R vide balayeuse	Dépôt - Chantier	3,1	0	3,1
A plein matériaux « bitume »	Raffinerie - Centrale	56	229	285
R vide matériaux « bitume »	Centrale - Raffinerie	56	229	285
A plein matériaux « granulats neufs »	Carrière - Centrale	96	77	173
R vide matériaux « granulats neufs »	Centrale - Carrière	96	77	173
A plein matériaux « enrobé »	Centrale - Chantier	56	0	56
R vide matériaux « enrobé »	Chantier - Centrale	56	0	56
Transport des engins				
AR Fraiseuse	Nantes - Chantier			
AR Balayeuse	Centrale - Chantier	56	229	285
AR Finisseur	Centrale - Chantier	56	229	285
AR Compacteurs	Centrale - Chantier	56	229	285

**Tableau 5 - 14. scénario de transport des matériaux et des engins.**

*A = aller, R = retour, distances selon (Michelin, 2003).*

### 5.3.2. Méthode de calcul des consommations et des émissions

La quantification des flux a été réalisée à partir des distances parcourues selon le scénario considéré précédemment. Pour calculer la consommation et les émissions des camions, on considère que la consommation des camions vides est égale à 80% de la consommation d'un camion plein. Lorsqu'un camion n'est pas chargé au maximum, sa consommation est pondérée d'un facteur compris entre 80 % et 100 % et proportionnel à la charge transportée. Les consommations linéaires sont ramenées à l'unité fonctionnelle, soit une planche de 150 m d'une demi-chaussée. Elles sont calculées à partir de la formule suivante :

$$c_{\text{planche}} = d \cdot \frac{n \cdot 150}{1000} \cdot c_{\text{linéaire}}$$

avec

- $c_{\text{planche}}$  est la consommation ramenée à l'unité fonctionnelle en g/UF,
- $c_{\text{linéaire}}$  est la consommation ramenée au km linéaire de chaussée calculée en L/km,
- $n$  est le nombre de passes et  $d$  la densité du gazoil égale à 0,838.

Les masses à transporter déterminent le nombre de camions à utiliser. On suppose que le nombre de camions nécessaires est toujours disponible :

- pour des masses inférieures à 12 tonnes, on utilise un six-roues,
- pour des masses comprises entre 12 et 27 tonnes on utilise un semi-remorque, en effet, d'après les données obtenues [CERTU, 1997], un semi-remorque consomme moins que deux six-roues.

Le Tableau 5 - 15 présente les masses transportées et le nombre de camions calculé.

Taux de recyclage (%)	Masses (t)		Matériau ou engin	Trajet	Nombre de camions	
	aller	retour			Six-roues	Semi-remorques
Tous	-	-	Fraiseuse	Nantes-Chantier	0	1
Tous	-	-	Balayeuse	Centrale-Chantier	0	1
Tous	-	-	Répandeuse	Centrale-Chantier	1	0
Tous	-	-	Autres engins	Centrale-Chantier	0	3
0%	0	0			0	0
10%	0	11,5	Fraisat	Centrale-Chantier	1	0
20%	0	21,6	« classe a »		0	1
30%	0	33,1			1	1
0%	0	0			1	3
10%	0	0	Fraisat	Centrale-Chantier	0	3
20%	0	0	« classe c »		0	3
30%	0	0			1	2
0%	91,6	0			1	3
10%	80,0	0	Fraisat	Chantier-Dépôt	0	3
20%	70,0	0	« classe c »		0	3
30%	58,4	0			1	2
0%	4,2	0			0	1
10%	5,1	0	Balayures	Chantier-Dépôt	0	1
20%	5,8	0			0	1
30%	6,7	0			0	1
0%	5	0			1	0
10%	4,5	0	Bitume	Raffinerie-Centrale	1	0
20%	4,0	0			1	0
30%	3,5	0			1	0
0%	95,0	0			0	4
10%	85,0	0	Granulats	Carrière-Centrale	1	3
20%	75,0	0	naturels		0	3
30%	65,0	0			1	2
tous	100	0	Enrobés	Centrale-Chantier	0	4

*Tableau 5 - 15. Masses transportées et nombre de camions*

Les émissions atmosphériques des camions transportant les matériaux et les engins, ainsi que des engins roulants, ont été calculées à partir des données CORINAIR / COPER (CERTU, 1997), et des données de l'Emission Inventory Guidebook (EMEP, CORINAIR, 2001) pour le CO<sub>2</sub> uniquement, présentées dans le Tableau 5 - 16.

Type de camion	Type de zone	Particules	Emissions (g/kg gasoil)			
			CO	COV	NOx	CO <sub>2</sub>
Six-roues	Rural	4,34	38,6	4,02	39,2	3138
	Autoroute	4,28	27,3	3,90	39	3138
Semi-remorque	Rural	4,27	22,6	7,9	45,1	3138
	Autoroute	4,25	14,3	7,8	45,9	3138

**Tableau 5 - 16. consommations et émissions unitaires des moteurs de camions – source : CERTU – CORINAIR**

### 5.3.3. Résultats

Les consommations et rejets à l'atmosphère dus au transport des engins et rapportés à l'unité fonctionnelle sont regroupés dans le Tableau 5 - 17.

Description	Gasoil (kg)	Emissions (g)				
		particules	CO	COV	NOx	CO <sub>2</sub>
Fraiseuse	92	393	2 225	574	3 960	287 943
Balayeuse	26	112	594	208	1185	82 466
Répandeuse	110	471	2 491	871	4 970	345 833
Autres engins	21	92	817	85	830	66 425
<b>TOTAL</b>	<b>249</b>	<b>1 068</b>	<b>6 127</b>	<b>1 737</b>	<b>10 945</b>	<b>782 666</b>

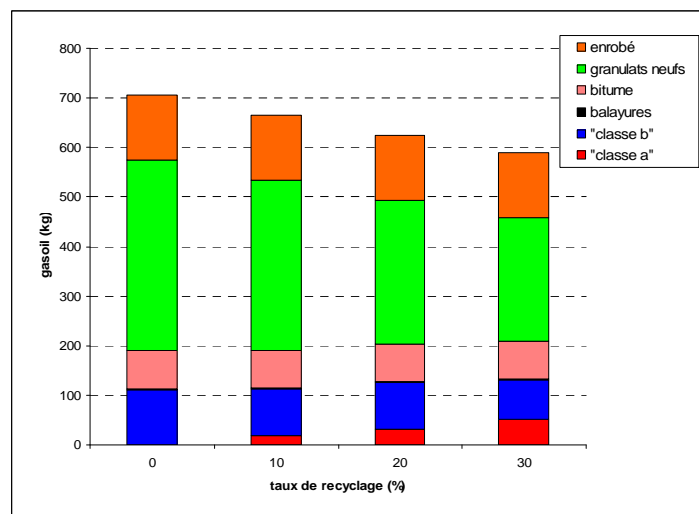
**Tableau 5 - 17. Consommations et émissions des transports des engins par UF**

Le Tableau 5 - 18 présente les résultats d'inventaire obtenus pour les transports des différents matériaux. Les consommations sont directement liées à la distance entre le lieu de stockage de ces engins et le chantier.

Matériaux transportés	Taux (%)	Gasoil (kg)	Emissions (g)				
			particules	CO	COV	NOx	CO <sub>2</sub>
	0%	0	0	0	0	0	0
Fraisats de "classe a"	10%	19	82	732	76	743	59 517
	20%	32	138	731	255	1 458	101 444
	30%	51	219	1 443	334	2 197	160 278
Fraisats de "classe c"	0%	112	478	2 810	812	4 929	350 302
	10%	94	400	2 116	740	4 224	293 874
	20%	94	400	2 115	739	4 220	293 635
	30%	80	344	2 103	565	3 518	252 149
Balayures	0%	2	7	37	13	75	5 204
	10%	2	7	38	13	75	5 225
	20%	2	7	38	13	75	5 243
	30%	2	7	38	13	76	5 264
Bitume	0%	77	331	2 278	303	3 013	242 193
	10%	77	330	2 267	301	2 998	240 994
	20%	76	328	2 256	300	2 983	239 796
	30%	76	326	2 245	298	2 968	238 597
Granulats naturels	0%	384	1 638	7 269	3 020	17 478	1 206 546
	10%	342	1 461	7 204	2 494	15 242	1 074 086
	20%	290	1 235	5 480	2 277	13 177	909 627
	30%	248	1 061	5 480	1 743	10 950	779 345
Enrobés	0%	131	560	2 964	1 036	5 915	411 584
	10%	131	560	2 964	1 036	5 915	411 584
	20%	131	560	2 964	1 036	5 915	411 584
	30%	131	560	2 964	1 036	5 915	411 584
<b>TOTAL</b>	0%	706	3 015	15 360	5 185	31 409	2 215 829
	10%	665	2 840	15 322	4 661	29 197	2 085 280
	20%	625	2 668	13 584	4 621	27 829	1 961 329
	30%	589	2 518	14 272	3 990	25 625	1 847 216

**Tableau 5 - 18. Consommations et émissions des transport des matériaux**

La Figure 5 - 4 permet de visualiser la répartition de la consommation en carburant gasoil du transport de chaque matériau par rapport à l'ensemble. On constate que l'augmentation de la consommation en fonction du taux de recyclage du transport des fraisats de « classe a » n'est pas compensée par la diminution de la consommation des transports des fraisats de « classe c ». Le transport du bitume est quasiment identique pour les quatre taux, les différences de masses transportées étant minimales. Le transport des balayures est, quant à lui, négligeable par rapport à celui des autres matériaux, car la distance parcourue est faible (3,1 km). C'est donc essentiellement la diminution de la consommation due au transport des granulats neufs qui compense l'augmentation due au transport des fraisats de « classe a ». Cette étape concerne les masses de matériaux les plus importantes, sur une grande distance (173 km).



*Figure 5 - 4. Répartition de la consommation en gasoil par UF en fonction des matériaux transportés*

Etant calculées en fonction des consommations, les rejets à l'atmosphère suivent les mêmes tendances et n'appellent pas de commentaire particulier.

## 5.4. DONNEES COLLECTEES NON RETENUES POUR L'INVENTAIRE ET LE CALCUL DES IMPACTS

### 5.4.1. Cas des nuisances

Les mesures des nuisances odorantes et sonores ne se traduisent pas par un flux massique. Elles sont donc difficiles à inclure dans un inventaire. Elles peuvent servir à l'élaboration d'indicateurs de nuisances, au niveau de la phase d'évaluation des impacts de la méthode ACV, mais leur prise en compte fait intervenir des aspects de ressentis subjectifs, et leur traduction en terme d'indicateur chiffré est un champ d'étude en plein développement. Si des valeurs chiffrées sont donc actuellement difficiles à intégrer au niveau de l'inventaire et/ou de l'évaluation des impacts, les résultats de comparaisons sont résumés ici.

### **Odeurs émises à la mise en oeuvre**

Pour l'enrobé chaud, la source d'odeur, composée de plusieurs produits odorants, est mise en évidence à partir de la détermination du seuil de perception olfactif de l'odeur du mélange gazeux. L'olfactomètre permet de diluer l'échantillon à des niveaux connus et de le présenter sous masque à un expert qui réalise la mesure. Pour chaque expert, on détermine le facteur de dilution K50 à appliquer au gaz pour que sa probabilité individuelle de perception olfactive soit de 50%. A partir des résultats individuels, on déduit le facteur de dilution moyen représentatif d'un échantillon de population. Cette grandeur est représentative de la persistance de l'odeur à la dilution. Multipliée par le débit volumique gazeux, elle donne le flux d'odeur émis qui a ensuite été ramené à la surface de la planche étudiée. Ainsi, plus le facteur de dilution est important, plus les rejets gazeux sont odorants. Le classement des flux d'odeurs permet de comparer les différentes modalités de fabrications de l'enrobé. Le dispositif mis en place et décrit dans le chapitre 4, a permis de mesurer la dilution du mélange odorant, présenté dans le Tableau 5 - 19.

<b>Modalité</b>	<b>Facteur de dilution K50 (unité d'odeur)</b>
Classique	$1,84.10^9$
Avec 10%	$0,66.10^9$
Avec 20%	$0,89.10^9$
Avec 30%	$0,16.10^9$

**Tableau 5 - 19. facteurs de dilution des odeurs**

On constate que pour les conditions d'expérimentation l'augmentation du taux de recyclage s'est accompagnée d'une réduction d'émissions odorantes des enrobés mis en oeuvre. Cette constatation apparaît logique dans la mesure où, pour l'expérimentation, la fabrication comportant la plus grande quantité de liant neuf (et donc le plus de fractions volatiles), était la fabrication classique.

Compte tenu des conditions de mesure du flux d'odeur (détermination d'un facteur de dilution) :

- il n'est pas possible d'utiliser directement le facteur de dilution au seuil de perception comme une mesure de la nuisance, puisqu'il n'existe pas de proportionnalité univoque entre le facteur de dilution au seuil de perception et la nuisance odorante (norme NF X 43-101),
- il s'agit plus d'un impact sur l'homme que d'une pression sur l'environnement car la mesure d'odeurs fait intervenir la perception de l'expert.

Il faut noter que la perception négative ou positive d'une odeur est un facteur humain qui ne peut être pris en compte par une mesure, mais limite également la portée du résultat obtenu.

### **Bruit émis par le matériel**

La prise en compte du bruit dans l'inventaire pose le problème du niveau sonore, des fréquences mais aussi de sa durée.

Les résultats des mesures de bruit sur le site du chantier, ont montré que pour la fraisage, la vitesse était le paramètre le plus influent notamment par rapport à l'épaisseur fraisée. Etant donné le scénario de fraisage choisi, le bruit tendrait donc à

diminuer avec le taux de recyclage, car la fraiseuse fonctionne plus longtemps à vitesse réduite.

Les niveaux de bruit obtenus pour les autres engins sont assez homogènes d'une planche à l'autre. Le taux recyclage de l'enrobé choisi n'a donc que peu d'influence sur les résultats obtenus.

Enfin, à la centrale de fabrication, le changement d'enrobé n'a pas eu d'influence sur les niveaux sonores observés.

#### **5.4.2. Cas des émissions dans l'eau de la chaussée en service**

La quantification expérimentale des flux de polluants dans l'eau concerne essentiellement deux étapes :

- la route en service, afin de distinguer l'effet éventuel du taux de recyclage des fraisats dans la couche de liaison,
- le stockage des agrégats d'enrobés non recyclés.

Concernant la route en service, les rejets peuvent dépendre du taux de recyclage de l'enrobé de la couche de liaison, mais également de l'enrobé utilisé pour la couche de roulement située au-dessus, ainsi que des véhicules circulant sur la chaussée. Ainsi, afin d'éclairer les résultats obtenus *in situ* lors du suivi de la couche de liaison en service, des essais en laboratoire concernant les rejets dans l'eau spécifiques des matériaux ont donc également été réalisés. Ces essais sur matériaux en laboratoire ont également été réalisés dans l'objectif de modéliser les flux émis lors du stockage des agrégats d'enrobés.

Les analyses physico-chimiques du suivi en place n'ont d'une part, pas montré de différences significatives entre les quatre planches étudiées, et ainsi, l'effet du taux de recyclage n'est pas avéré, et serait négligeable en regard des effets du salage hivernal notamment. D'autre part, les flux d'émission dans les eaux collectées, ont percolé à la fois au travers la couche de liaison étudiée, et au travers de la couche de roulement située au-dessus : il ne peuvent donc pas être attribués à l'objet de cette étude ACV. Enfin, les flux mesurés s'avèrent faibles, et une investigation plus poussée ne présente alors que peu d'intérêt.

Les essais en laboratoire n'ont pas non plus mis en évidence des rejets importants, puisque les concentrations obtenues sont en majoritairement trouvées sous les seuils réglementaires. De plus, les essais de percolation sur carottes et de lixiviation sur fraisats broyés sont difficilement convertibles à l'unité fonctionnelle. En effet, les expérimentations à l'échelle du laboratoire posent un problème de changement d'échelle dont les paramètres pertinents sont a priori nombreux : durée de percolation, surface spécifique d'échange liquide-solide, présence ou non d'oxygène, pH et conductivité de l'eau de percolation...

## 5.5. CONCLUSION

Les résultats d'inventaire obtenus sont présentés dans le Tableau 5 - 20.

Type de flux	Unité	Taux de recyclage					
		0%	10%	20%	30%		
<b>Energie consommée</b>	gaz naturel	MJ	$3,76 \cdot 10^4$	$4,03 \cdot 10^4$	$3,63 \cdot 10^4$	$3,47 \cdot 10^4$	
	pétrole	MJ	$4,93 \cdot 10^4$	$4,68 \cdot 10^4$	$4,43 \cdot 10^4$	$4,20 \cdot 10^4$	
	électricité	MJ	$9,19 \cdot 10^3$	$8,62 \cdot 10^3$	$8,04 \cdot 10^3$	$7,46 \cdot 10^3$	
	propane	MJ	3,95	3,95	3,95	3,95	
<b>Emissions dans l'air</b>	SO <sub>2</sub>	g	$5,97 \cdot 10^3$	$5,39 \cdot 10^3$	$4,82 \cdot 10^3$	$4,24 \cdot 10^3$	
	NOx	g	$5,47 \cdot 10^4$	$5,26 \cdot 10^4$	$5,04 \cdot 10^4$	$4,83 \cdot 10^4$	
	CO <sub>2</sub>	g	$4,89 \cdot 10^6$	$5,13 \cdot 10^6$	$4,99 \cdot 10^6$	$5,12 \cdot 10^6$	
	CO	g	$2,41 \cdot 10^4$	$2,44 \cdot 10^4$	$2,26 \cdot 10^4$	$2,37 \cdot 10^4$	
	hydrocarbures	g	$3,23 \cdot 10^3$	$2,92 \cdot 10^3$	$2,61 \cdot 10^3$	$2,30 \cdot 10^3$	
	poussières	g	$5,22 \cdot 10^3$	$5,07 \cdot 10^3$	$4,83 \cdot 10^3$	$4,72 \cdot 10^3$	
	métaux	g	$1,76 \cdot 10^1$	$1,59 \cdot 10^1$	$1,42 \cdot 10^1$	$1,25 \cdot 10^1$	
	HCl	g	5,70	5,15	4,60	4,05	
	N <sub>2</sub> O	g	2,58	2,31	2,04	1,77	
	COV	g	$1,33 \cdot 10^4$	$2,03 \cdot 10^4$	$1,05 \cdot 10^4$	$1,03 \cdot 10^4$	
	CH <sub>4</sub>	g	$8,08 \cdot 10^{-2}$	$7,23 \cdot 10^{-2}$	$6,38 \cdot 10^{-2}$	$5,53 \cdot 10^{-2}$	
	phénanthrène	mg	5,40	5,60	6,60	8,50	
	fluoranthène	mg	12,5	3,70	10,4	6,60	
	benzo(b)fluoranthène	mg	$1,71 \cdot 10^{-2}$	$6,84 \cdot 10^{-2}$	$6,27 \cdot 10^{-2}$	$7,98 \cdot 10^{-2}$	
	benzo(a)anthracène	mg	7,82	2,72	3,57	3,77	
	chrysène	mg	7,32	2,76	3,66	3,86	
	pyrène	mg	22,4	2,70	11,8	5,50	
	<b>Emissions dans l'eau</b>	pétrole ou hydrocarbures	g	$1,15 \cdot 10^2$	$1,04 \cdot 10^2$	$9,26 \cdot 10^1$	$8,15 \cdot 10^1$
		acide	g	$1,55 \cdot 10^2$	$1,40 \cdot 10^2$	$1,25 \cdot 10^2$	$1,10 \cdot 10^2$
		phénol	g	1,40	1,25	1,11	$9,67 \cdot 10^{-1}$
phosphore		g	5,96	5,38	4,81	4,23	
chlore		g	$5,18 \cdot 10^1$	$4,68 \cdot 10^1$	$4,18 \cdot 10^1$	$3,68 \cdot 10^1$	
composés organiques dissous		g	$1,04 \cdot 10^2$	$9,36 \cdot 10^1$	$8,36 \cdot 10^1$	$7,36 \cdot 10^1$	
azote		g	$4,12 \cdot 10^1$	$3,73 \cdot 10^1$	$3,33 \cdot 10^1$	$2,93 \cdot 10^1$	
demande chimique en oxygène		g	$1,04 \cdot 10^3$	$9,36 \cdot 10^2$	$8,36 \cdot 10^2$	$7,36 \cdot 10^2$	
demande biologique en oxygène		g	$9,07 \cdot 10^1$	$8,19 \cdot 10^1$	$7,32 \cdot 10^1$	$6,44 \cdot 10^1$	
métaux		g	$2,59 \cdot 10^1$	$2,34 \cdot 10^1$	$2,09 \cdot 10^1$	$1,84 \cdot 10^1$	
<b>Déchets solides</b>	solides	g	$5,65 \cdot 10^2$	$5,10 \cdot 10^2$	$4,56 \cdot 10^2$	$4,01 \cdot 10^2$	
	déchets	t	$9,16 \cdot 10^1$	$8,10 \cdot 10^1$	$7,16 \cdot 10^1$	$6,10 \cdot 10^1$	
<b>Ressources naturelles</b>	eau	t	1,20	1,53	1,47	1,81	
	bauxite/roches calcaires /minerai de fer	kg	3,77	3,41	3,04	2,68	
	Acier	kg	$1,99 \cdot 10^{-1}$	$4,22 \cdot 10^{-1}$	$4,22 \cdot 10^{-1}$	$6,46 \cdot 10^{-1}$	
	Bitume	t	5,18	4,68	4,18	3,68	
	Granulats naturels	t	$9,50 \cdot 10^1$	$8,50 \cdot 10^1$	$7,50 \cdot 10^1$	$6,50 \cdot 10^1$	

Tableau 5 - 20. Inventaire du cycle de vie de la couche de liaison selon le système étudié

Un inventaire des flux environnementaux destiné à comparer différents taux de recyclage d'enrobé dans une couche de liaison a été établi à partir de données expérimentales collectées, et de données bibliographiques, comme schématisé sur Figure 5 - 5. Il est important de rappeler cette démarche car les résultats obtenus sont tributaires des hypothèses émises, des scénarios élaborés ainsi que des frontières du système tel qu'il a été défini.

L'inventaire donné dans cet ouvrage diffère légèrement au niveau des flux émis en HAP, de celui utilisé lors de l'évaluation des impacts [Ventura et al, 2004]. Les impacts provoqués par les HAP sont essentiellement de nature toxicologique et écotoxicologique. Le calcul d'indicateurs relatifs à ces impacts reste un sujet encore controversé et en pleine évolution, et il est donc fréquent d'utiliser des facteurs de sécurité. Un premier facteur de sécurité utilisé dans [Ventura et al, 2004] concerne les seuils de détection. Les flux des HAP ayant été détectés mais non quantifiés car au-dessous du seuil de quantification des appareillages, ont été augmentés de la valeur du seuil de quantification. Un second facteur de sécurité concerne les HAP émis lors de la mise en œuvre. Dans l'évaluation des impacts, ils ont été considérés comme plus susceptibles de nocivité car ils sont plus directement au contact du personnel que les HAP émis à la cheminée de la centrale d'enrobage. Comme il est courant en analyse de risque sanitaire, leur flux a été multiplié par 1000. Cela se traduit par une différence de flux surtout visible pour le benzo[b]fluoranthène, qui est le HAP majoritairement émis à la mise en œuvre.

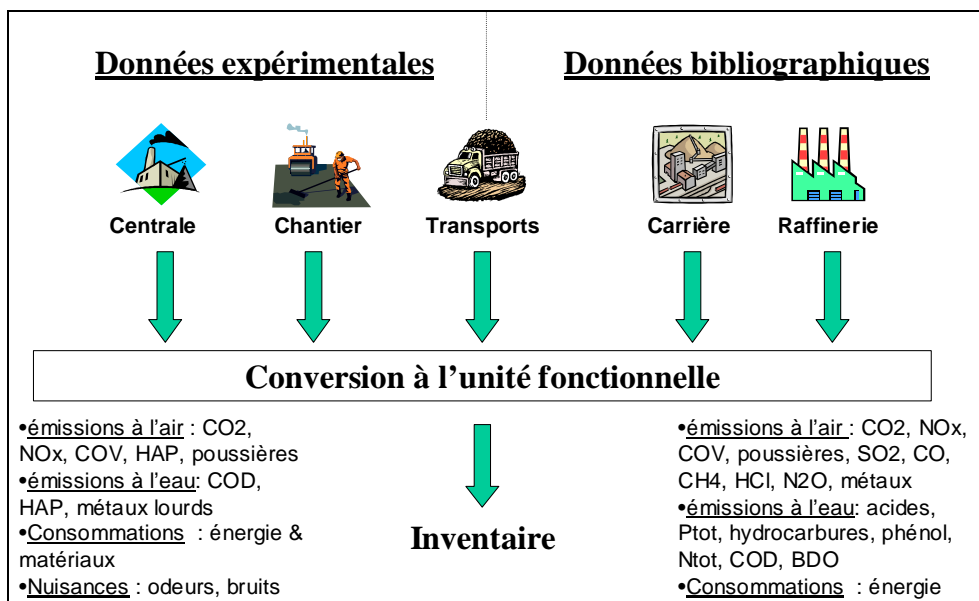


Figure 5 - 5. Schéma de la démarche de réalisation de l'inventaire

Concernant la centrale d'enrobage, le lien entre rejets atmosphériques et taux de recyclage n'est pas forcément établi. Les émissions gazeuses ne sont pas forcément directement liées à la quantité de bitume (neuf ou ancien) utilisée. Il est également possible que le recyclage, puisqu'il implique l'introduction de fraisats au milieu du tambour, modifie considérablement les conditions d'émissions, et soit considéré comme un procédé à part entière, sans lien direct avec le procédé sans recyclage. Les émissions des centrales d'enrobage obtenues pour cet inventaire ne sont donc



pas généralisables, et une étude plus poussée du procédé reste à faire pour mieux comprendre leur origine et adapter les données d'inventaire aussi bien aux paramètres de fonctionnement du procédé qu'aux matériaux bitumineux produits.

Concernant le fraisage, les valeurs de consommations destinées à l'inventaire ont été calculées à partir des valeurs relevées totales, en se basant sur l'approximation que la consommation est proportionnelles à la durée de fraisage. De fait, il est probable qu'à des épaisseurs différentes, la fraiseuse développe des puissances différentes, ce qui implique des consommations différentes. La prise en compte du paramètre épaisseur lors de la déconstruction, serait intéressant à considérer par la suite.

Concernant les engins en général, les émissions des moteurs ont été calculées en fonction des données de consommation, à partir de données bibliographiques, en les assimilant à des camions. Les émissions causées par la combustion du propane qui a lieu lors de l'utilisation de la répandeuse et du finisseur, ont été négligées.

Concernant les émissions de l'enrobé chaud à la mise en œuvre, les connaissances apportées par l'étude, en sachant que toutes les fabrications d'enrobés ont été réalisées avec le même liant d'apport et avec la supposition que les évolutions de température soient identiques, il semble que les émissions diffuses produites par la couche d'enrobé chaud soient liées à la présence de liant ancien.

Globalement, le regroupement des différentes données obtenues a nécessité une harmonisation des données mesurées pour les différents procédés afin de les faire correspondre à l'unité fonctionnelle. En effet, certaines données ont été collectées à une échelle différente de l'objet étudié. D'autres données expérimentales, de par la technique d'analyse utilisée, ont fourni des valeurs de concentrations et non de flux, et une conversion a été nécessaire. D'autres données encore se sont avérées insuffisantes pour une harmonisation et il a fallu élaborer des scénarios afin d'obtenir les valeurs d'inventaire. Enfin, d'autres données, malgré leur pertinence, n'ont pas pu être attribuée à l'unité fonctionnelle pour des raisons méthodologiques, et n'ont pas été incluses dans l'inventaire.