

## La modélisation du transport routier dans Ecoinvent

La modélisation du transport routier dans nos études de cas s'est basée sur le module « *Transport, lorry, 16-32 t, EURO 4 /RER* ». Les différents termes de ce module sont maintenant expliqués :

- « Lorry » : le transport est effectué en camion ;
- « 16-32 t » se réfère à la catégorie de camions utilisée. On retrouve également les catégories 3.5- 7.5 t, 3.5-16t, 7.5-16t, 20-28t et >32t ;
- « EURO 4 » : précise la réglementation en termes d'émissions respectée par le véhicule. Ecoinvent permet de choisir entre les réglementations EURO 3, EURO 4 et EURO 5. En réalité, il existe des notations spécifiques pour distinguer les normes d'émissions pour les camions et les voitures. Ainsi, les normes des voitures sont suivies d'un chiffre arabe tandis que celles des camions sont suivies d'un chiffre romain [ADEME, 2014]. Dans le cadre de la thèse, nous nous intéressons uniquement aux camions mais par souci d'homogénéité avec la notation Ecoinvent les normes des camions seront notées avec les chiffres arabes ;
- « RER » : spécifie pour quelle région géographique, les données ont été calculées. Il existe dix possibilités : RER pour un contexte européen et CH pour un contexte Suisse.

Le tableau suivant récapitule l'ensemble des modules disponibles pour la modélisation du transport :

Module	Unité
Transport, lorry 3.5-7.5t, EURO 3, RER	tkm
Transport, lorry 3.5-7.5t, EURO 4, RER	tkm
Transport, lorry 3.5-7.5t, EURO 5, RER	tkm
transport, lorry 3.5-16t, fleet average, RER	tkm
transport, lorry 3.5-20t, fleet average, RER	tkm
Transport, lorry 7.5-16t, EURO 3, RER	tkm
Transport, lorry 7.5-16t, EURO 4, RER	tkm
Transport, lorry 7.5-16t, EURO 5, RER	tkm
Transport, lorry >16t, fleet average, RER	tkm
Transport, lorry >28t, fleet average, CH	tkm

Transport, lorry 20-28t, fleet average, CH	tkm
Transport, lorry 28t, rape methyl ester 100%, CH	tkm
Transport, lorry 16-32t, EURO3, RER	tkm
Transport, lorry 16-32t, EURO 4, RER	tkm
Transport, lorry 16-32t, EURO 5, RER	tkm
Transport, lorry >32t, EURO 3, RER	tkm
Transport, lorry >32t, EURO 4, RER	tkm
Transport, lorry >32t, EURO 5, RER	tkm

L'ensemble de ces modules est exprimé en tkm c'est à dire des tonnes-kilomètres. Une tonne-kilomètre est définie comme le transport d'une tonne de marchandises sur une distance de 1 kilomètre. De plus, il est important de noter que 15 tkm peuvent représenter à la fois le transport de 15 tonnes de marchandises sur un kilomètre ou bien le transport d'une tonne de produit sur 15 kilomètres. Le transport peut être également modélisé non pas selon une tonne kilomètre mais directement par son chargement comme dans la thèse de Bernd Polster [Polster, 1995]. La charge représente, selon la densité de marchandises transportée, soit le poids soit le volume. Le transport est alors estimé par la relation entre le poids ou le volume de la marchandise et la charge pleine du camion.

Afin de réduire les pollutions issues du transport, des normes d'émissions ont commencé à voir le jour au début des années 1990. Cette réglementation est devenue de plus en plus stricte, comme le présente le tableau 27 [DGTIM, 2011] :

Normes	Textes de référence	Mise en application	NOx (g/kWh)	CO (g/kWh)	HC (g/kWh)	Particules (g/kWh)
Euro 0	88/77	01/10/1990	14,4	11,2	2,4	-
Euro 1	91/542 (A)	01/10/1993	9	4,9	1,23	0,36
Euro 2	91/542 (B)	01/10/1996	7	4	1,1	0,15
Euro 3	1999/96	01/10/2001	5	2,1	0,66	0,13
Euro 4	1999/96	01/10/2006	3,5	1,5	0,46	0,02
Euro 5	1999/96	01/10/2009	2	1,5	0,46	0,02
Euro 6	Règlement (CE) n°595/2009	31/12/2013	0,4	1,5	0,13	0,01

Le tableau 27 présente l'évolution normative concernant les exigences envers les poids lourds, bus et cars. Les voitures doivent également respecter des normes d'émissions dont les seuils sont différents.

Dans la version 2.2 d'Ecoinvent [Frischknecht, 2007], des données concernant des camions respectant les normes EURO 3, 4 et 5 sont accessibles [Spielmann, 2007]. Le choix de l'utilisateur quant au module adéquat à utiliser reposera, quand il sera en possession des informations, sur l'ancienneté du camion ou bien à partir d'une moyenne du parc existant. Ainsi, un camion mis en circulation avant octobre 2006 devrait être modélisé par un camion EURO 3. Notre choix dans les modélisations du chapitre précédent s'est porté sur le module

« *Transport, 16-32t, EURO 4, RER* ». Il s'agit d'un compromis : nous considérons un camion que l'on pourrait qualifier de « moyen » en termes d'âge, ni trop vieux ni trop récent. À l'instar des autres modules de camions, le procédé « *Transport, 16-32t, EURO 4, RER* » modélise une motorisation diesel. En effet, les poids lourds marchandises, c'est-à-dire les camions dont le poids total autorisé est supérieur à 3,5 tonnes, fonctionnent presque exclusivement au diesel [OFEV, 2013]. Ce constat semble également fait en France [SOeS, 2015], où la distinction diesel/essence pour les Véhicules Utilitaires Légers (VUL) est réalisée ce qui n'est pas le cas pour les véhicules lourds.

La description approfondie de ce module est maintenant détaillée. Pour la suite, ce module et la méthodologie qui lui est associée (l'approche en tkm) sera qualifiée de méthode de référence.

### 3.2 Description du module « *Transport, 16-32 t, EURO 4, RER* »

Ce process Ecoinvent intègre la consommation de carburant (*Operation, lorry 16-32t, EURO 4*), l'amortissement du véhicule (production (*Lorry 28 t*), la maintenance (*Maintenance, lorry 28 t*) et la fin de vie (*Disposal, lorry 28 t*)), l'amortissement des infrastructures routières (fabrication de la route (*Road*), sa maintenance (*Operation, maintenance, road*) et sa fin de vie (*Disposal, road*). L'ensemble de ces processus est récapitulé dans le tableau 28 :

Tableau 28 : Description du module " <i>Transport, lorry 16-32t, EURO 4, RER</i> "				
Processus	Zone géographique couverte	Infrastructure	Valeur	Unité
<i>Operation, lorry 16-32t, EURO 4</i>	RER	Non	$1,7346 \cdot 10^{-1}$ (D1)	km
<i>Lorry 28 t</i>	RER	Oui	$3,2123 \cdot 10^{-7}$ (D2)	unité
<i>Maintenance, lorry 28 t</i>	CH	Oui	$3,2123 \cdot 10^{-7}$ (D2)	unité
<i>Disposal, lorry 28 t</i>	CH	Oui	$3,2123 \cdot 10^{-7}$ (D2)	unité
<i>Road</i>	CH	Oui	$1,2935 \cdot 10^{-3}$ (D3)	mètre*année (m*a)
<i>Operation, maintenance, road</i>	CH	Oui	$2,0331 \cdot 10^{-4}$ (D4)	mètre*année (m*a)
<i>Disposal, road</i>	RER	Oui	$1,2935 \cdot 10^{-3}$ (D3)	mètre*année (m*a)

Ce module est principalement constitué de processus d'infrastructures. Certains sont adaptés à la situation suisse comme les opérations de maintenance de la route faute de données plus globales au niveau européen. Afin de pouvoir adapter ce module « *Transport, lorry, 16-32t, EURO 4, RER* » à la fois au contexte français et au cas spécifique des chantiers de démolition, il est important de connaître les données et les hypothèses posées pour le calcul des valeurs des différents sous-processus. Pour cela, dans le tableau 28, nous notons D1, D2, D3 et D4 les valeurs des sous-processus (appelés « demand factors ») :

- D1 la valeur du module « *Operation, lorry, 16-32 t, EURO 4, RER* » ;
- D2 la valeur pour l'amortissement du camion (production, maintenance et fin de vie) ;
- D3 la valeur pour l'amortissement de la route (production et fin de vie) ;
- D4 la valeur pour la maintenance de la route.

Nous allons expliciter les calculs des valeurs D1, D2, D3 et D4 afin de comprendre comment ont été construits les 7 sous-processus présentés dans le tableau 28. Dans la suite de ce chapitre, les modules « *Transport, lorry, 16-32 t, EURO 4/RER* » et « *Operation, lorry, 16-32 t, EURO 4, RER* » seront respectivement appelés modules « *Transport* » et « *Operation* ».

### 3.2.1 « *Operation, lorry 16-32t, EURO 4, RER* »

Le module « *Operation* » dont l'unité est le km, comptabilise les flux liés à la consommation de carburant et aux différentes émissions, comme montré sur la figure 25.



Figure 25 : Description du module "*Operation, lorry 16-32t, EURO 4, RER*"

Le module est construit en considérant une charge moyenne transportée de 5,76 t [Spielman, 2007]. Pour obtenir cette valeur de charge moyenne, une moyenne a été calculée sur une période donnée, pour une catégorie de camion donnée sur la quantité de marchandises transportée par ces camions selon le nombre de kilomètres parcourus [EVEA forum, 2013]. Or, l'unité du module «*Transport*» est le tkm soit l'acheminement d'une tonne de marchandises sur un kilomètre. Il faut donc ramener le module « *Operation* » à une tonne de marchandises transportée. Pour cela, il suffit de diviser par la charge moyenne.

$$D1 = \frac{1}{CM (16-32t)} \quad (1)$$

$$D1 = \frac{1}{5,76} = 1,73 \cdot 10^{-1}$$

Avec :

- CM (16-32t) : la charge moyenne de la catégorie 16-32t exprimée en t.

On retrouve bien la valeur de D1 donnée dans le tableau 28.

### 3.2.2 « Lorry 28 t / RER », « Maintenance, lorry 28 t / RER » et « Disposal, lorry 28 t / CH »

Les flux principaux constituant le module de fabrication du camion sont présentés sur la figure 26 :

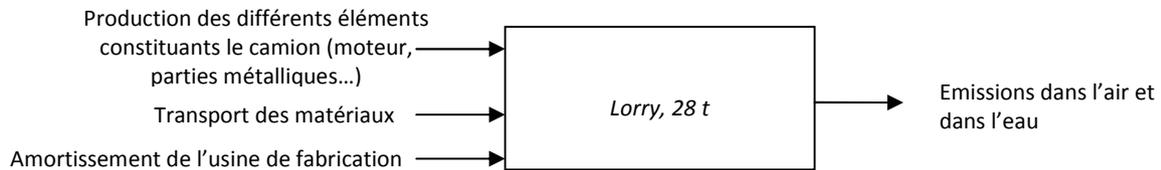


Figure 26 : Description du module "Lorry, 28 t"

Plusieurs sources ont été utilisées pour modéliser la fabrication du camion : une partie de la composition en matériaux est issue d'une déclaration produit d'un constructeur de poids lourds [Volvo Trucks, 2004], l'autre provient de deux rapports environnementaux d'une entreprise située en Allemagne et de ses sous-traitants [MAN Nutzfahrzeuge, 2000 et 2002]. Ces études se sont notamment intéressées à la fabrication du moteur et des différentes parties métalliques ainsi qu'à l'assemblage final. Le transport des matériaux (par route ou rail) et l'amortissement de l'usine fabriquant le camion sont également intégrés.

Les flux principaux constituant le module de maintenance du camion sont présentés sur la figure 27 :

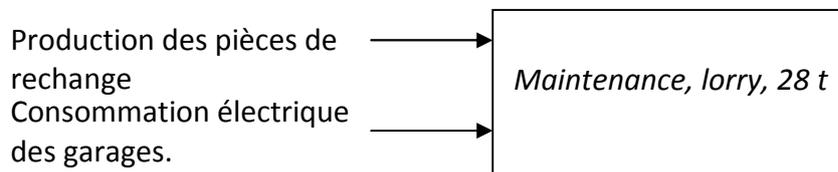


Figure 27 : Description du module "Maintenance, lorry 28 t"

Sur la figure 27, aucune émission n'est représentée. Cela signifie qu'il n'y a aucune émission dans l'air, l'eau ou le sol directement attribuable au module « Maintenance, lorry, 28t ». Cependant, les émissions de la production des pièces de rechange ou de la consommation électrique des garages sont intégrées, c'est-à-dire les émissions des sous-procédés. La même remarque peut être faite pour les figures 28 et 32.

Les flux principaux constituant le module de fin de vie du camion sont présentés sur la figure 28 :

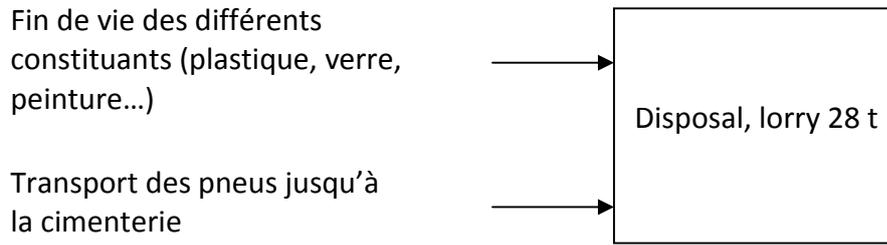


Figure 28: Description du module "Disposal, lorry 28 t"

La fin de vie du camion comprend l'incinération des plastiques, du verre, des résidus de zinc et de la peinture, le transport des pneus jusqu'à une cimenterie, et l'incinération de l'huile. Une allocation dite « cut off » est appliquée sur les parties métalliques (acier, aluminium et cuivre) et les pneus. Cette approche considère que les impacts liés au recyclage sont attribués au cycle de vie du produit utilisant la matière recyclée, ce même cycle de vie étant exempté des impacts liés à la production des matières premières. Dans notre cas, la production des parties métalliques est prise en compte tandis que leur collecte et leur recyclage seront considérés dans le cycle de vie des produits utilisant les matériaux recyclés [Frischknecht, 2010].

Le calcul de D2 permet de quantifier la quantité de camion amortie à chaque tkm parcourue. Pour ce faire, on se base sur la performance du camion tout au long de son cycle de vie, c'est-à-dire la distance totale parcourue durant sa phase d'utilisation et la quantité de marchandises transportée en moyenne. À l'instar du calcul de D1, celui de D2 va utiliser une charge moyenne (5,76 t). Au final, pour chaque tkm parcourue, le camion est amorti de :

$$D2 = \frac{1}{DVK (16-32t) * CM (16-32t)} \quad (2)$$

$$D2 = \frac{1}{540\,000 * 5,76} = 3,21 \cdot 10^{-7}$$

Avec :

- DVK : la durée de vie kilométrique, c'est-à-dire le nombre de kilomètres parcourus tout au long de la phase d'exploitation exprimée en km ;
- CM : la charge moyenne, c'est-à-dire la quantité moyenne de marchandises transportées par un camion de la catégorie 16-32t exprimée en t.

Les données sur la performance kilométrique et la charge moyenne se retrouvent dans le rapport Ecoinvent 14 [Spielmann, 2007] respectivement dans les tableaux 5-14 page 21 et 5-118 page 92.

Nous retrouvons bien la valeur de D2 donnée dans le tableau 28.

### 3.2.3 « Road / CH » et « Disposal, road / CH »

Les flux principaux constituant le module de production de la route sont présentés sur la figure 29 :

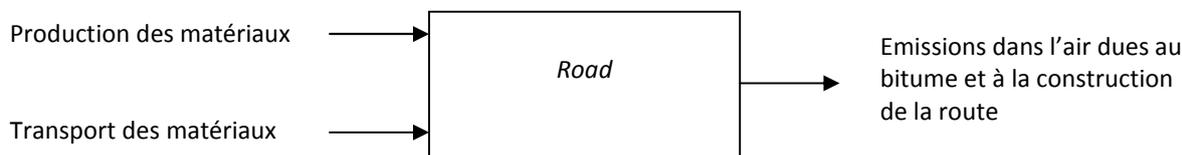


Figure 29 : Description du module "Road"

La production et le transport des matériaux constituant la route (granulats, bitume et béton) ainsi que les émissions dues à la construction de la route sont pris en compte. Les détails de ces couches routières sont donnés sur la figure 30.

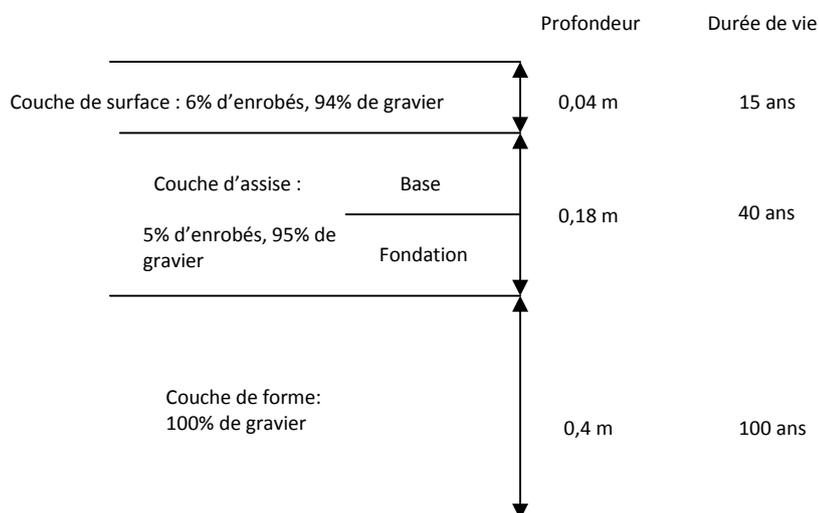


Figure 30: Caractéristiques des différentes couches routières d'une route suisse

La quantité totale de matériaux utilisée dépendra de la catégorie de la route. Les routes suisses sont classées en 4 types de routes : les autoroutes, les routes de classe 1, 2 et 3. 10 % des autoroutes ont une couche de surface constituée de béton. Cette fraction de route n'est pas représentée sur la figure 6 mais est prise en compte dans les calculs. L'inventaire a été réalisé pour une route moyenne suisse dont la durée de vie est de 100 ans avec des durées de vie différentes pour les diverses couches. Les impacts de la construction de ponts et de tunnels sont également intégrés.

Les chaussées des routes françaises sont, quant à elles, réalisées en enrobés bitumineux à chaud. Ces chaussées correspondent aux chaussées utilisées sur les routes départementales et communales qui représentent 98 % de la longueur du réseau routier français dont les caractéristiques sont présentées sur la figure 31 issue de la FDES d'une chaussée en enrobés bitumineux à chaud [Bio Intelligence Service, 2014] :



Figure 31 : Les couches d'une chaussée d'une route française [Bio Intelligence Service, 2014]

Les profondeurs des couches routières dans les deux pays sont équivalentes : la couche d'assise constituée des couches de base et de fondation est égale à 18 cm dans les deux pays tandis que la couche de surface en France et en Suisse est respectivement de 6 et 4 cm. Les couches d'accrochage ne sont pas mentionnées dans le rapport Ecoinvent [Spielmann, 2007]. Pour modéliser l'entretien, Ecoinvent s'appuie sur les durées de chacune des couches reportées à la durée de vie totale de 100 ans. En France, seule la couche de surface sera modifiée : elle fera l'objet de rechargement ou d'enlèvement et de remplacement. Les compositions des couches sont semblables dans les deux pays.

La couche de forme a une fonction mécanique. Son épaisseur dépendra de la nature et des caractéristiques de cette couche ainsi que de la Partie Supérieure des Terrassements (PST) qui est le sol support sur lequel repose la couche de forme. Le guide technique « Réalisation des Remblais et des couches de forme » [SETRA, 2000] permet de calculer l'épaisseur de la couche de forme. Dans les annexes, cette épaisseur varie entre 0,2 et 0,8 m et des valeurs généralement situées aux alentours de 0,35 m. Les GNT (Graves Non Traités) sont généralement utilisées dans ces couches. Que ce soit l'épaisseur ou la nature des matériaux, les couches de forme françaises et suisses sont comparables.

Les flux principaux constituant le module de fin de vie de la route sont présentés sur la figure 32 :

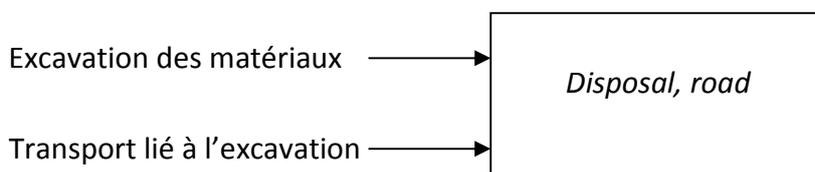


Figure 32 : Description du module "Disposal, road"

Il contient l'excavation de la route et le transport associé à cette excavation. Les impacts liés au recyclage de ces terres excavées ne sont pas pris en compte.

Le calcul du facteur D3 permet d'estimer la quantité de route amortie chaque année pour 1 tkm parcourue. Ce calcul de l'amortissement de la route (construction et fin de vie) doit tenir compte du fait que les voies routières sont partagées par un grand nombre d'utilisateurs ne disposant pas de la même catégorie de véhicules (camions, voitures, moto...). L'usure de la

route est liée au poids des véhicules, à leur chargement ainsi qu'au nombre de kilomètres parcourus par chacun d'entre eux.

En premier lieu, on commence par calculer la « pression » subie par le réseau routier européen durant une année. Elle s'exprime comme la somme pour chaque catégorie de véhicules du produit des kilomètres parcourus par le poids brut d'un véhicule (appelé Gtkm gross-ton kilometre performance). Ce poids brut correspond à la somme de la charge moyenne et du poids net du camion. Dans le cas des camions de 16-32 t auxquels cette étude s'intéresse, le rapport Ecoinvent considère un poids de 10 t et une charge moyenne de 5,76 t, soit une charge brute de 15,76 t. Ils ont parcouru  $1,09 \cdot 10^{11}$  km lors de l'année de référence [Spielmann, 2007].

Cette « pression » ainsi calculée, il s'agit alors d'allouer une portion de route par Gtkm. L'ensemble du réseau routier européen est estimé à 4 848,2 milliers de km (Tableau 5-116 de la page 91) [Spielmann 2007]. Ce réseau routier européen correspond à la somme des longueurs des différentes catégories de routes. On retrouve les autoroutes, les routes nationales, régionales, le réseau secondaire et une catégorie « Autres routes » dont on ne connaît pas le détail. En divisant cette longueur totale par la pression calculée précédemment, on alloue une portion de route à chaque Gtkm sur une année. Cette approche ne permet pas de différencier les endommagements causés sur chacune des catégories de route. De plus, les routes ne présentent pas le même trafic et les chaussées ne sont pas dimensionnées de la même façon selon leur importance et selon le pays où elles se trouvent ne subissant pas le même endommagement au passage d'un camion par exemple.

Enfin, il s'agit alors de ramener cette allocation à une tkm, c'est-à-dire à la marchandise transportée et non au poids brut. En multipliant cette allocation par le ratio poids brut / charge moyenne, on obtient l'amortissement de la route pour 1 tkm.

La formule finale est donc :

$$D3 = \frac{LRR_e}{\sum (PK_i * PB_i)} * \frac{PB (16-32t)}{CM (16-32t)} \quad (3)$$

$$D3 = \frac{LRR_e}{\sum Gtkm_i} * \frac{PB (16-32t)}{CM (16-32t)}$$

$$D3 = 1,30E^3$$

Avec :

- LRR<sub>e</sub> : la longueur de réseau routier européen, c'est à dire la somme des longueurs des différentes catégories de routes exprimée en km ;
- PB : le poids brut, soit la somme de la charge moyenne et le poids net d'un véhicule exprimée en t ;

- PK : la performance kilométrique, soit la quantité de kilomètres parcourus par une catégorie de véhicules pendant 1 an exprimée en km ;
- CM : la charge moyenne exprimée en t ;
- Gtkm : le produit de la PK et du PB exprimé en tkm ;
- i : une catégorie de véhicules.

Les différentes étapes de calcul sont maintenant explicitées. Dans un premier temps, on calcule le Gtkm total à partir des données du tableau 5-118 page 92 [Spielmann, 2007] :

$$\sum Gtkm_i = Gtkm (\text{van}) + Gtkm (\text{camion } 3,5-7,5 \text{ t}) + Gtkm (\text{camion } 7,5-16\text{t}) + Gtkm (\text{camion } 16-32\text{t}) \\ + Gtkm (\text{camion } >32\text{t}) + Gtkm (\text{voiture}) + Gtkm (\text{moto}) + Gtkm (\text{Bus}) + Gtkm (\text{autocar})$$

$$\sum Gtkm_i = PK (\text{van}) * PB (\text{van}) + PK (\text{camion } 7,5-16\text{t}) * PB (\text{camion } 7,5-16\text{t}) + PK (\text{camion } 16-32\text{t}) \\ * PB (\text{camion } 16-32\text{t}) + PK (\text{camion } >32\text{t}) * PB (\text{camion } >32 \text{ t}) + PK (\text{voiture}) * PB (\text{voiture}) \\ + PK (\text{moto}) * PB (\text{moto}) + PK (\text{bus}) * PB (\text{bus}) + PK (\text{autocar}) * PB (\text{autocar})$$

$$\sum Gtkm_i = 3,01.10^{11} * 2,7 + 5,88.10^{10} * 6,0 + 2,27.10^{10} * 10,8 + 1,09.10^{10} * 15,76 + 9,33.10^{10} * 29,7 + \\ 2,93502.10^{12} * 1,3 + 5,84701.10^{11} * 0,2 + 8,28.10^9 * 12 + 2,37.10^{10} * 11,9$$

$$\sum Gtkm_i = 1,02.10^{13} \text{ tkm}$$

Dans un second temps, cette valeur est utilisée pour calculer la valeur de D3 de la catégorie « 16-32 t ». La longueur du réseau routier européen est donnée dans le tableau 5-116 page 91 tandis que le poids brut et la charge moyenne sont fournis par le tableau 5-118 [Spielmann, 2007] :

$$D3 = \frac{4\,848,2.10^6}{1,02.10^{13}} * \frac{15,76}{5,76} = 1,30.10^{-3}$$

On retrouve la valeur de D3 donnée dans le tableau 28.

### 3.2.4 « Operation, maintenance, road / CH »

Les flux principaux constituant le module de maintenance de la route sont présentés sur la figure 33 :

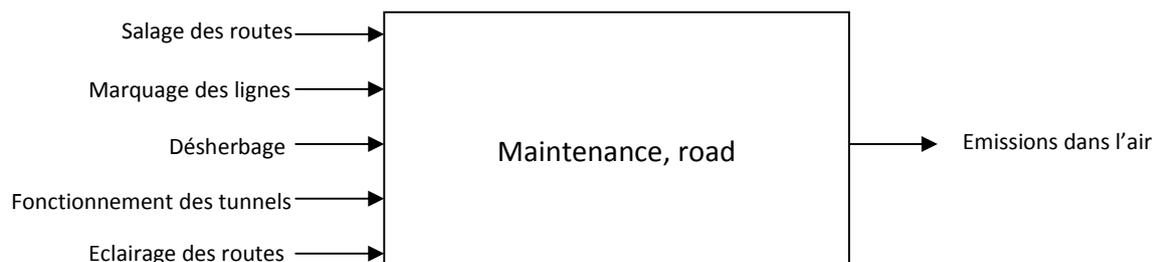


Figure 33 : Description du module "Maintenance, road"

Il comprend l'ajout de sel pour dégeler (viabilité hivernale), le marquage des lignes, le désherbage, l'éclairage des routes et des tunnels et la ventilation des tunnels. Le renouvellement de la route n'est pas intégré puisqu'il l'est déjà dans le module « Road ».

Le calcul de D4 permet de quantifier la longueur de route entretenue annuellement pour 1 tkm.

Pour estimer les impacts de la maintenance, on passe par l'occupation temporelle de l'infrastructure qui, en première approximation, est reliée au kilométrage effectué par chaque catégorie de véhicules. On alloue une portion de route à entretenir à chaque kilomètre parcouru. Pour obtenir l'allocation finale pour une tkm d'un camion de 16-32 t, il suffit de diviser par la charge moyenne qui est égale à 5,76 t.

$$D4 = \frac{LRR_e}{\sum PK_i} * \frac{1}{CM (16-32t)} \quad (4)$$

Avec :

- LRR<sub>e</sub> : la longueur de réseau routier européen, c'est à dire la somme des longueurs des différentes catégories de routes exprimée en km ;
- PK : la performance kilométrique, soit la quantité de kilomètres parcourus par une catégorie de véhicules pendant 1 an exprimée en km ;
- CM : la charge moyenne exprimée en t ;
- i : une catégorie de véhicules.

Les différentes étapes du calcul sont maintenant explicitées. Dans un premier temps, la somme des performances kilométriques annuelles de chaque catégorie de véhicule est calculée :

$$\begin{aligned} \sum PK_i &= PK (\text{van}) + PK (\text{camion } 7,5-16t) + PK (\text{camion } 16-32 t) + PK (\text{camion } >32 t) + PK \\ &(\text{voiture}) + PK (\text{moto}) + PK (\text{bus}) + PK (\text{autocar}) \\ \sum PK_i &= 3,01.10^{11} + 5,88.10^{10} + 2,27.10^{10} + 1,09.10^{10} + 9,33.10^{10} + 2,93502.10^{12} + 5,84701.10^{11} \\ &+ 8,28.10^9 + 2,37.10^{10} \\ \sum PK_i &= 4,14.10^{12} \text{ km} \end{aligned}$$

Dans un second temps, cette valeur est utilisée pour calculer la valeur de D4 de la catégorie « 16-32 t ».

$$D4 = \frac{4\,848,2.10^6}{4,14.10^{12}} * \frac{1}{5,76} = 2,03.10^{-4}$$

On retrouve la valeur de D4 donnée dans le tableau 28.

### Conclusion partielle

En regardant plus en détail la construction du module « *Transport* », plusieurs points d'amélioration apparaissent. Le premier concerne la non prise en compte du retour à vide et ses implications quant aux émissions des camions. En effet, dans le cas des chantiers de démolition, il est fréquent que les camions chargés de déposer les déchets en décharge ou sur les plateformes de recyclage et de tri reviennent à vide. On estime que 45 % des parcours dans le secteur de la construction sont réalisés à vide [SOeS, 2014]. Leur consommation en carburant et les émissions induites seront donc différentes. De plus, la charge moyenne pour les camions de 16-32 t est de 5,76 t ce qui semble un chiffre relativement faible. Il s'explique par le fait qu'aucune distinction n'est réalisée entre des camions transportant des déchets du BTP et ceux transportant des marchandises alimentaires par exemple. Les premiers sont limités par la masse tandis que les seconds sont limités par le volume. La charge des camions varie en réalité de manière importante selon la nature des marchandises transportées.

Nous nous proposons donc d'adapter la méthode de référence selon les caractéristiques des camions utilisés sur les chantiers de démolition. Nous allons dans un premier temps ajuster la quantité totale de carburant consommée en considérant que la moitié du trajet est réalisée à charge utile maximale et l'autre moitié à vide.

## 3.3 La prise en compte de la variation de la charge des camions

L'adaptation aura d'abord des conséquences sur les quantités d'émissions produites par les camions à chaque kilomètre parcouru. Un camion chargé à son maximum autorisé consommera plus de carburant et émettra plus de polluants qu'un camion à vide.

### 3.3.1 Prise en compte du retour à vide

Afin de s'adapter au cas spécifique des chantiers de démolition dont l'étape d'évacuation des déchets impliquent des rotations de camions et donc des retours à vide, la prise en compte de la variation de la consommation a été proposée à partir de la formule (5) suivante présente dans le fascicule de données FD P01-015 [AFNOR, 2006] :

$$38/100 * km * (1/3 * Cr/24 + 2/3 + T_{RAV} * 2/3) * N \quad (5)$$

Avec :

38/100 (soit 38 litres aux 100 kilomètres) la consommation de carburant d'un camion de 24 t de charge utile plein. La charge utile est la quantité maximale de marchandises qu'un camion peut transporter.

km : la distance de transport du produit

Cr : la charge réelle dans le camion comprenant la masse des emballages et des palettes

T<sub>RAV</sub> : pourcentage du taux de retour à vide

N : le nombre de camions nécessaires pour transporter cette quantité

Vides, les camions consomment moins de carburant lors de leur trajet retour. Cette diminution se retrouve par le facteur 2/3 associé au paramètre  $T_{RAV}$ . Si nous nous plaçons dans le scénario d'un camion ( $N = 1$ ) plein ( $Cr = 24$  tonnes) transportant des déchets jusqu'à une installation de stockage par exemple située à un kilomètre ( $km = 1$ ) et revenant vide ( $T_{RAV} = 1$ ), nous obtenons alors à l'aide de la formule (5) :

$$\begin{aligned}\text{Quantité de diesel} &= 38/100 * 1 * (1/3 * 24/24 + 2/3 + 1 * 2/3) * 1 \\ &= 38/100 * 5/3 \\ &= 0,633 \text{ L}\end{aligned}$$

Ainsi, un trajet d'un kilomètre soit deux kilomètres aller-retour demande pour un camion de 24 t de charge utile parti plein et revenu vide une quantité de 0,633 L de diesel. En d'autres termes, un camion plein consommera 0,38 L par kilomètre parcouru tandis que vide il consommera 0,253 L, soit 0,633 L sur une distance totale de 2 km. Pour simplifier les calculs, nous considérons un kilomètre moyen englobant une charge pleine à l'aller et un retour à vide. Dans notre flux de référence, nous utiliserons donc une quantité de 0,3165 L (valeur différente de celle utilisée dans Ecoinvent, comme explicité dans la partie 3.3.2.7). De plus, il est important de noter que considérer une variation linéaire de la consommation en fonction de la charge est une approximation.

Cette quantité de carburant peut se reporter dans le module « *Operation* ». Si nous modifions la quantité de diesel de ce procédé, la quantité d'émissions sera également modifiée. Nous nous attelons donc maintenant à une description plus précise du module « *Operation* » pour comprendre comment sont calculées les différentes émissions.

### 3.3.2 Description du module « *Operation* »

Ce module comprend l'ensemble des sous-processus liés au fonctionnement du véhicule soit la quantité de carburant, les émissions du moteur sortant du pot d'échappement et celles dues à l'abrasion des pneus.

Les différentes émissions selon leur source ou l'approche méthodologique utilisée ont été séparées en 6 catégories :

- Les émissions dans l'air issues de la consommation en diesel (Groupe 1) ;
- Les émissions dans l'air issues du pot d'échappement (Groupe 2) ;
- Les émissions d'hydrocarbures qui sont dérivées de la fraction totale d'émissions (Non-Methan HydroCarbons) (Groupe 3) ;
- Les émissions dans l'air restantes issues du pot d'échappement (Groupe 4) ;
- Les émissions dans l'air qui ne sont pas issues du pot d'échappement incluant des fractions de métaux lourds (Groupe 5) ;

- Les émissions de métaux lourds allant dans l'eau et le sol issues de l'abrasion des pneus. (Groupe 6)

Groupe 1	Dioxyde de carbone, dioxyde de soufre, cadmium, cuivre, chrome, nickel, sélénium, zinc, plomb, mercure, chrome IV
Groupe 2	Monoxyde de carbone, oxydes d'azote, particules et hydrocarbures
Groupe 3	Méthane, toluène, benzène, xylène, formaldéhyde, acétaldéhyde, hydrocarbures non méthaniques
Groupe 4	Ammoniac, protoxyde d'azote, hydrocarbure aromatique polycyclique (HAP)
Groupe 5	Particules, zinc, cuivre, cadmium, chrome, nickel, plomb, benzopyrène
Groupe 6	Zinc, cuivre, cadmium, chrome, nickel, plomb

Le tableau 29 récapitule l'ensemble des éléments de chacun des 6 groupes. On peut d'ores et déjà remarquer qu'un élément peut apparaître dans plusieurs groupes différents.

### 3.3.2.1 Groupe 1

Cette première catégorie d'émissions peut directement être reliée aux substances à l'aide de facteurs d'émissions qui définissent la quantité de substances émise par kg de carburant brûlé. Les facteurs d'émissions suivants sont donnés dans le tableau 30 :

Substance	Quantité (en mg/kg)	Source
Dioxyde de carbone	3,17E <sup>06</sup>	[EMEP/CORINAIR, 2006]
Dioxyde de soufre	100	[EMEP/CORINAIR, 2006]
Cadmium	0,01	[EMEP/CORINAIR, 2006]
Cuivre	1,7	[EMEP/CORINAIR, 2006]
Chrome	0,05	[EMEP/CORINAIR, 2006]
Chrome IV	1,0.10 <sup>-4</sup>	Source non connue : hypothèse que 0.2% de chrome est émis sous forme de chrome IV.
Nickel	0,07	[EMEP/CORINAIR, 2006]
Sélénium	0,01	[EMEP/CORINAIR, 2006]
Zinc	1	[EMEP/CORINAIR, 2006]
Plomb	1,1.10 <sup>-7</sup>	[Jungbluth, 2003]
Mercure	2,10 <sup>-5</sup>	[Jungbluth, 2003]

Lorsqu'on applique ces facteurs d'émissions à la quantité de diesel indiquée dans le module « Operation », soit 0,20539 kg de « diesel, low-sulphur, at regional storage », nous retrouvons précisément la valeur indiquée pour certains des flux du tableau 5. Par exemple,

pour le mercure, le facteur d'émissions est de  $2.10^{-5}$  mg par kg de diesel, soit pour 0,20539 kg une quantité émise de mercure de :

$$\text{Quantité émise de mercure} = \text{facteur d'émission} * \text{quantité de carburant} = (2.10^{-5} / 1\ 000\ 000) * 0,20539 = 4,11.10^{-12} \text{ kg}$$

Pour d'autres flux comme le cadmium, la quantité calculée par nos soins se révèle différente du résultat présent dans le module. Cela s'explique par le fait que les sources d'émissions de cadmium sont multiples : le carburant bien sûr mais également l'abrasion des pneus et des freins tandis que les émissions de mercure sont uniquement reliées au diesel.

### 3.3.2.2 Groupe 2

Les données européennes sont issues de [REMOVE, 2007] qui précise les émissions des flux du groupe 2 selon la catégorie des camions (3.5-7.5t ; 7.5-16t ; 16-32t et >32t) et la norme d'émissions respectée (EURO 3, 4 ou 5). Elles sont regroupées dans le tableau 5.53 page 45 du rapport Ecoinvent [Spielmann, 2007]. Dans le tableau 31, seules les valeurs de la catégorie 16-32 t sont données :

Émission / Polluant	Valeur (en g/km)
Monoxyde de carbone	$4,3.10^{-2}$
Oxydes d'azote (NOx)	3,4
Particules	$2,1.10^{-2}$
Hydrocarbures	$6,7.10^{-3}$

Le tableau initial dans le rapport n'indique pas les unités mais par déduction des résultats finaux implémentés, ils sont donnés en g/km.

### 3.3.2.3 Groupe 3

Les données utilisées pour quantifier les flux du groupe 3 consultables dans le tableau 32 proviennent de l'[EMEP/CORINAIR, 2006] et sont indiquées comme une fraction des émissions totales en hydrocarbures non méthaniques.

Émission / Polluant	Valeur (en g/km)
Hydrocarbures non méthaniques	$1,8.10^{-3}$
Méthane	$5,0.10^{-3}$
Toluène	$1,8.10^{-7}$
Benzène	$1,3.10^{-6}$
m, p, o Xylène	$1,6.10^{-5}$
Formaldéhyde	$1,5.10^{-4}$
Acétaldéhyde	$8,3.10^{-5}$

Le tableau initial dans le rapport n'indique pas les unités mais, par déduction des résultats finaux implémentés, ils sont donnés en g/km.

#### 3.3.2.4 Groupe 4

La quantification du protoxyde d'azote est donnée par [TREMOVE, 2007] tandis que pour l'ammoniac on se réfère à la donnée suisse en première approximation [Keller, 2004]. Une estimation brute est donnée pour les HAP (Hydrocarbure Aromatique Polycyclique) de  $1.10^{-6}$  g/km.

#### 3.3.2.5 Groupe 5

En premier lieu, cette 5<sup>ème</sup> catégorie regroupe les particules émises, que ce soit par l'abrasion des pneus, des freins ou de la route. Différentes tailles de particules se retrouvent dans l'air dont les quantités sont tirées de la littérature ([Camatini, 2001] pour l'abrasion des pneus, [EMEP/CORINAIR, 2003] pour l'abrasion des freins). Par contre, aucune source n'est mentionnée pour l'abrasion de la route.

Taille des particules	Unité	Quantité
TSP-PM10	g/km	0,057
PM10-PM2.5	g/km	0,062
PM2.5	g/km	0,035

D'autre part, cette catégorie reprend également les émissions de métaux lourds issues de l'abrasion des pneus et des freins. Celles-ci proviennent de [EMEP/CORINAIR, 2003] dont les données sont reprises dans le tableau 34 :

Espèces	Abrasion du pneu (en ppm)	Abrasion du frein (en ppm)
Zinc	430	270
Cuivre	1,8	370
Cadmium	0,3	2,7
Chrome	0,4	115
Nickel	0,9	133
Plomb	1	50

#### 3.3.2.6 Groupe 6

En réalité seule une fraction des métaux lourds due à l'abrasion des pneus est émise dans l'air. La fraction restante est relâchée dans l'eau et dans le sol. Comme aucune information n'est disponible à ce sujet alors en première approximation, Ecoinvent pose l'hypothèse que 50% est émis dans le sol et l'autre moitié dans l'eau.

Tableau 35 : Données pour calculer les émissions dans le sol et l'eau des métaux lourds dans le cas d'un camion de 28 tonnes		
	Unité	Valeur
Kilométrage total du véhicule	km	540 000
Durée de vie d'un lot de pneu	km	75 000
Masse d'un pneu	kg	47,5
Pertes	%	20%
Abrasion par pneu	kg	9,5
Nombre de pneus par véhicule	unités	12
Nombre de pneus par véhicule tout au long de son cycle de vie	unités	86,4
Abrasion totale	g/km	1,52
Émissions dans l'air	g/km	0,1530
Pertes restantes	g/km	1,37

Explicitons le calcul réalisé pour parvenir à la donnée 1,37 g/km.

Un pneu possède une durée de 75 000 km et pèse 47,5 kg. Sur cette masse totale, 20 %, soit 9,5 kg par pneus, sont rejetés dans l'environnement à cause du phénomène d'abrasion. En admettant un nombre de pneus égal à 12 par véhicule, un camion aura besoin de :

$$\text{Nombre total de pneus} = \frac{540\,000}{75\,000} \times 12 = 86,4 \text{ pneus}$$

Sachant qu'on constate 9,5 kg de pertes par pneu, nous obtenons une abrasion totale sur la durée de vie du véhicule de :

$$\text{Abrasion totale} = \frac{86,4 * 9,5 * 1000}{540\,000} = 1,52 \text{ g / km}$$

Il suffit alors de soustraire les émissions dans l'air à ce total et répartir les pertes restantes de manière égale dans l'eau et le sol.

### Résultat d'analyse du modèle

D'après cette première analyse, il semblerait que lorsqu'on modifie la quantité de carburant consommée par un camion, seuls les flux constituant le groupe 1 doivent être modifiés. Notre but, maintenant, est donc de modifier le module « *Operation* » afin de prendre en compte les modifications induites sur la valeur des émissions de la nouvelle quantité de carburant calculée dans la partie 3.3.1.

### 3.3.2.7 Modification du module « *Operation* »

Nous devons d'abord changer la quantité initiale de diesel par la quantité calculée dans la partie 3.3.1. soit 0,3165 L par km. En considérant une masse volumique pour le diesel de 840 kg par m<sup>3</sup> nous obtenons par conversion :

$$\text{Masse de diesel nécessaire} = \frac{0,3165 * 840}{1\ 000} = 0,26586 \text{ kg}$$

Cette quantité est plus importante que dans le module « *Operation* » initial où une quantité de carburant de 0,20539 kg était consommée sur 1 km.

À partir de cette nouvelle donnée, il s'agit alors de modifier les flux des substances du groupe 1 dont la quantité est directement liée à la quantité de diesel consommée. Nous pouvons les diviser en deux catégories : les substances que l'on retrouve uniquement dans le groupe 1 (CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, Se, Hg) et celles dont les sources d'émissions sont variées et qui apparaissent dans d'autres groupes (Zn, Cu, Cd, Cr, Ni et Pb). Ces deux sous-catégories seront respectivement appelées groupe 1A et groupe 1B.

Pour le groupe 1A, il suffit de calculer le produit de la masse de diesel nécessaire (soit 0,26586 kg) avec le facteur d'émission de la substance retranscrit dans le tableau 30. Les valeurs des flux obtenus sont données dans le tableau 36 :

Flux	Facteur (en mg/kg)	Valeur finale (en kg)
Dioxyde de carbone	3172.10 <sup>3</sup>	0,843
Dioxyde de soufre	100	2,66.10 <sup>-5</sup>
Sélénium	0,01	2,66 <sup>-9</sup>
Mercure	2.10 <sup>-5</sup>	5,32 <sup>-12</sup>

Concernant les éléments du groupe 1B, nous devons dans un premier temps, estimer pour chacune de ces substances la quantité d'émissions dans l'air qui n'est pas issue de la consommation de carburant. Pour cela, nous reprenons le module « *Operation* » initial, c'est-à-dire celui présent initialement dans Ecoinvent et qui ne peut être modifié afin de réaliser cette estimation. Nous relevons la quantité totale de ces substances émises dans l'air à laquelle nous soustrayons la quantité émise liée directement au carburant brûlé.

Dans un deuxième temps, dans le module « *Operation* » modifié, nous calculons la quantité émise de chaque substance avec la nouvelle masse de diesel nécessaire à laquelle nous additionnons la quantité d'émissions dans l'air qui n'est pas issue de la consommation de carburant pour intégrer le retour à vide. Ces différentes données sont regroupées dans le tableau 37 :

Flux/Substance	Émission totale module initial (en kg)	Émission due au carburant (en kg)	Émission indépendante du carburant (en kg)	Émission du carburant dans le nouveau module (en kg)	Émission totale dans le nouveau module (en kg)
Cadmium	$2,59.10^{-9}$	$2,05.10^{-9}$	$5,39.10^{-10}$	$2,66.10^{-9}$	$3,20.10^{-9}$
Cuivre	$1,99.10^{-6}$	$3,49.10^{-7}$	$1,64.10^{-6}$	$4,52.10^{-7}$	$2,10.10^{-6}$
Chrome	$3,32.10^{-8}$	$1,03.10^{-8}$	$2,29.10^{-8}$	$1,33.10^{-8}$	$3,62.10^{-8}$
Nickel	$3,07.10^{-8}$	$1,44.10^{-8}$	$1,63.10^{-8}$	$1,86.10^{-8}$	$3,48.10^{-8}$
Plomb	$1,05.10^{-7}$	$2,26.10^{-14}$	$1,05.10^{-7}$	$2,92.10^{-14}$	$1,05.10^{-7}$
Zinc	$8,13.10^{-7}$	$2,05.10^{-7}$	$6,08.10^{-7}$	$2,66.10^{-7}$	$8,74.10^{-7}$

### Exemple du calcul dans le cas du cadmium :

L'émission totale de cadmium dans l'air dans le module initial est directement récupérée à partir de la base de données Ecoinvent. Le produit de la quantité de carburant dans le module initial avec le facteur d'émission du cadmium permet d'obtenir l'émission directement liée au diesel.

$$\begin{aligned}
 \text{Émission de cadmium due au carburant} &= \text{Facteur d'émissions} \times \text{Quantité de carburant} \\
 &= (0,01 / 1\,000\,000) * 0,20539 \\
 &= 2,05.10^{-9} \text{ kg}
 \end{aligned}$$

Nous calculons à partir du précédent résultat et des émissions totales, les émissions de cadmium indépendantes de la consommation, soit :

$$\begin{aligned}
 \text{Émissions de cadmium indépendantes du carburant} &= \text{Emissions totales de cadmium dans le module initial} - \text{Emissions de cadmium dues au carburant} \\
 &= 2,59.10^{-9} - 2,05.10^{-9} \\
 &= 5,39.10^{-10} \text{ kg}
 \end{aligned}$$

Ensuite, nous faisons la somme des émissions de cadmium dues à la quantité de carburant consommée et celles indépendantes de cette consommation.