

Modélisation des émissions de CO₂ du transport pour la création de modèles d'optimisation logistique

A la différence de la plupart des travaux qui cherchent à optimiser la logistique par rapport à un objectif économique, le premier but de ce travail de recherche est de minimiser les émissions de CO₂ de la logistique en se focalisant sur le transport de fret, puis d'évaluer l'impact économique des solutions obtenues et de les comparer à l'optimisation économique classique. A cette fin, il est nécessaire de modéliser les émissions des moyens de transport et les coûts logistiques pris en compte afin de construire les modèles d'optimisation.

Les transports routiers et ferroviaires sont les deux moyens de transport étudiés dans ce travail du fait de leur importance dans le transport terrestre de marchandise. Au niveau de la modélisation des émissions, il existe actuellement de nombreuses références portant sur les émissions globales liées à ces modes de transport. Cependant, la revue de littérature sur ce sujet laisse entrevoir de nombreuses différences au niveau du calcul des facteurs d'émission entre les méthodologies recensées, ce qui est problématique. En effet, la variance des références amènera une incertitude non négligeable sur les résultats d'optimisation. C'est la raison pour laquelle, dans un premier temps, nous allons modéliser de manière analytique les émissions de CO₂ pour obtenir des facteurs d'émissions des camions et des trains qui se conforment au besoin des modèles d'optimisation et de l'évaluation de la performance écologique de la mutualisation.

Quant à l'évaluation économique dans le contexte de la grande distribution, plusieurs composantes des coûts logistiques seront considérées, à savoir, le coût du transport, le coût de stockage, le coût de passage du flux par plateforme et le coût d'arrêt d'un véhicule à un point de livraison lors d'une tournée. Les valeurs quantitatives de ces composantes proviennent essentiellement des données fournies par les partenaires des études réelles que nous avons menées pour expérimenter le concept de mutualisation et qui seront développées dans le quatrième et le cinquième chapitre. En tout état de cause, il s'agit donc de coûts réalistes mais confidentiels.

Ensuite, nous passerons à la formalisation des nouveaux modèles d'optimisation fondés sur la minimisation des émissions de CO₂ liées au transport, car comme nous le soulignerons, la recherche bibliographique montre qu'il n'existe pas encore de modèles d'aide à la décision

qui visent à concevoir un réseau logistique en minimisant les émissions de transport. Il s'agira donc d'un apport important de ce travail doctoral.

Pour ce faire, nous allons d'abord mener une revue de littérature sur la typologie des réseaux et sur les modèles existants qui intègrent le problème du transport dans la conception d'un réseau de distribution. Puis, nous choisirons les modèles les plus adaptés pour formuler le problème. Il nous faudra par la suite intégrer les fonctions d'émissions aux modèles retenus, afin de créer de nouveaux modèles d'optimisation qui viseront à définir des schémas logistiques qui génèrent un minimum de CO₂ mais sans mettre en cause le taux de service.

Ce chapitre est donc organisé en trois parties. Les deux premières parties identifient et expliquent les méthodologies de modélisation des émissions de CO₂ des moyens de transport considérés et les principes d'élaboration des coûts logistiques. La dernière partie définit les modèles d'optimisation utilisés dans ce travail.

4.1 Modélisation des émissions de CO₂ des moyens de transport de marchandises

Comme nos cas d'application concernent le transport des produits pour la grande distribution en France, le Transport Routier de Marchandises (TRM) et le Transport Ferroviaire de Marchandises (TFM) sont les deux modes de transport pris en compte dans cette thèse, même si le raisonnement peut être transposé à d'autres moyens de transport. Ce choix se base sur deux raisons. Premièrement, la route et le chemin fer sont les deux canaux les plus concernés pour le transport de fret en France, voir les Chapitres 2 et 3. Deuxièmement, le report modal de transport de fret de la route vers les autres modes, et spécialement le ferroviaire, est considéré comme une solution qui rend les transports moins polluants. Cela constitue un autre intérêt de ce travail de recherche.

Une fois les moyens déterminés, il faut ensuite connaître leur performance au niveau des émissions de CO₂. Dans cette partie, nous allons d'abord illustrer les méthodologies d'estimation des émissions existantes liées aux deux modes de transport afin de montrer la nécessité de modéliser analytiquement les facteurs d'émissions pour répondre aux objectifs de notre recherche.

4.1.1 Méthodologies actuelles pour estimer les émissions de CO₂ des transports routiers et ferroviaires

Préalablement, nous précisons que les émissions considérées dans ce travail représentent le CO₂ émis directement par les camions dû à la combustion des carburants, ainsi que le CO₂ dû à la production d'énergie pour la traction des trains. En effet, du point de vue logistique, ces composantes des émissions sont celles sur lesquelles nous pouvons le plus agir du fait de leur relation importante avec les flux transportés et les schémas de transport retenus. Pour ce genre d'émissions, plusieurs références liées au Transport Routier (TR) et au Transport Ferroviaire (TF) sont disponibles dans la littérature, mais les méthodologies de calcul sous-jacentes sont hétérogènes ce qui les rend les comparaisons difficiles. Deux causes principales expliquent ces différences : l'usage de différentes unités de mesure et la méthodologie d'estimation des émissions.

En premier lieu, trois unités sont fréquemment utilisées pour mesurer les émissions des GES ou du CO₂ seul :

Equivalent carbone (kg éq C) : c'est une unité pour mesurer le PRG (Pouvoir Réchauffant Global) des autres gaz par rapport au CO₂. Puisque 1 kg de CO₂ contient 0,2727 kg de carbone qui correspond au rapport (masse moléculaire du carbone)/(masse atomique du CO₂), donc tout simplement 1 kg CO₂ = 0,2727 kg éq C. Pour les autres gaz, par exemple le méthane qui est un GES 23 fois plus puissant que le gaz carbonique, si on prend le CO₂ avec le PRG égal à 1 comme référence, alors 1 kg de méthane est égal à 6,2721 kg éq C (soit 23 x 0,2727 kg éq C). Ainsi, on peut avoir une unité identique pour présenter tous les GES. A noter que cette unité est la mesure officielle des émissions de GES, indiqué dans le Bilan Carbone de l'ADEME (Jancovici, 2007), p.11.

Equivalent CO₂ (kg éq CO₂) : l'objectif de cette unité est identique à l'équivalent carbone mais elle est souvent plus utilisée dans l'industrie. La différence est que l'on ne convertit pas les émissions en carbone, mais en CO₂. Donc, cette mesure donne des valeurs 3,67 fois supérieures à l'équivalent carbone, en raison du rapport (masse moléculaire du CO₂)/(masse atomique du carbone).

Emission de CO₂ seul (kg CO₂) : il s'agit de la quantité de CO₂ émise directement. Il ne faut donc pas confondre « l'équivalent CO₂ » avec « l'émission de CO₂ seul ». Pour souligner cela, prenons l'exemple d'un camion roulant, 1 kg CO₂ / km signifie que le camion émet 1 kg

de CO₂ par km sans tenir compte des autres GES. En revanche, 1 kg éq CO₂ / km veut dire que l'ensemble des GES émis par le camion par km est équivalent à 1 kg de CO₂. Par contre, si l'on mesure l'ensemble des GES émis par un camion convertis en équivalent CO₂, cette valeur est alors supérieure à celle des émissions de CO₂ seules.

Dans cette thèse, tous les résultats présentés seront mesurés et exprimés en émission de CO₂ seul.

Outre l'usage des unités de mesure, le choix de la méthodologie est un autre facteur critique pour estimer les émissions. Si l'on examine le cas du TR, comme il s'agit d'un secteur soumis à la pression environnementale, un certain nombre de facteurs d'émissions de GES ou de CO₂ sont disponibles. Concrètement, trois types de méthodologies existent pour estimer le facteur d'émissions : l'expérimentation, la statistique fondée sur des bases de données collectées et le calcul analytique. Le Tableau 4.1 recense les différentes méthodologies que nous avons pu identifier dans la littérature.

	Expérimentation	Statistique	Calcul analytique
Caractéristiques	Quantité émise réelle par un véhicule identifié sur un trajet donné	Valeur moyenne sur l'ensemble d'un parc de véhicules	Calcul basé sur les caractéristiques des différentes motorisations d'après les GuideBooks
Inconvénients	Expérimentation sur des véhicules particuliers et résultats spécifiques au cas	Pas de détail sur l'impact des différents facteurs : condition de conduite, vitesse, chargement...	Mise à jour des résultats conformément aux nouvelles motorisations et qui ne prennent pas en compte la performance réelle
Références	(Graham et al., 2008);	NAEI ³⁶ (GB); EPA ³⁷ (Etats-Unis); (McKinnon, 1999) et (McKinnon et Piccyk, 2009) ; (Zanni et Bristow, 2009) ; Projet TERM (EEA, 2008); Projet Auto-Oil (Commission Européenne, 2000); Bilan Carbone (Jancovici, 2007); (CITEPA, 2010);	Projet COPERT 1-4 de l'EEA (EEA, 1998), avec les projets MEET (Hickman et al., 1999), (Jorgensen et Sorenson, 1998) ; COST (Joumard, 1999); EMEP/CORINAIR (EEA, 2007); (Ubeda et al., 2010)

Tableau 4.1 : Comparaison des trois méthodes pour déterminer le facteur d'émissions de CO₂ liées au transport routier

Estimation expérimentale : pour estimer les émissions de CO₂ du TR, on peut directement tester la quantité de CO₂ rejetée par le véhicule au démarrage. Au niveau

³⁶ National Atmospheric Emissions Inventory : http://www.naei.org.uk/data_warehouse.php

³⁷ United States Environmental Protection Agency : <http://www.epa.gov/epahome/data.html>

technique, il s'agit de collecter proportionnellement les gaz émis par le puis de déterminer la masse de CO₂. Le facteur d'émissions est obtenu en se basant sur de nombreuses expérimentations selon le type de véhicule et la condition de route particulière. C'est la raison pour laquelle les facteurs d'émissions obtenus par les expérimentations sont spécifiques à l'étude de cas et risquent de ne pas être génériques pour les autres catégories de véhicule, malgré le fait qu'ils fournissent des références plus précises que les autres approches.

Estimation statistique : de façon différente, les émissions peuvent être estimées par des analyses statistiques sur les données collectées, autrement dit la méthodologie simple dans le GuideBook (EEA, 2007). L'estimation se fonde sur la somme des carburants consommés par des véhicules multipliée par le facteur d'émissions spécifique du polluant comme le CO₂ par exemple (McKinnon et Piecyk, 2009). Ainsi, le facteur d'émissions peut être déterminé par les émissions totales divisées par les parcours totaux réalisés par le parc des véhicules sur l'horizon de temps considéré. Par exemple, l'US EPA (*United States Environmental Protection Agency*) donne un facteur d'émissions de CO₂ du transport routier obtenu par les émissions totales nationales en route pour tous types de motorisation en 2005 divisées par les parcours totaux réalisés par le parc des véhicules nationaux à la même période, présenté dans (Gharzouzi et Baptiste, 2010). Il s'agit donc d'une valeur statistique pour tous les véhicules à un niveau national. Ce type de calcul s'appuie souvent sur les données collectées par des enquêtes dont les périmètres sont variables : type de véhicule, ancienneté du parc, chargement, km à vides, etc. Il est donc très difficile de comparer les facteurs obtenus par ce type de méthode, bien qu'ils reflètent correctement une réalité sur leur périmètre.

Estimation analytique : cette approche est nommée méthodologie détaillée dans (EEA, 2007) en précisant qu'il s'agit de la combinaison de données techniques (ex : les facteurs d'émission lors de la combustion en kg CO₂/kg fuel) et de données d'activité (ex : véhicules-kilomètres au total). Le but est d'estimer de façon précise les émissions de CO₂ soumises aux différentes variables de contrôle (catégorie de véhicule, vitesse, condition de route, etc.) en rectifiant les données techniques. Les résultats sont présentés dans les GuideBooks élaborés par plusieurs organismes, comme (EEA, 1998) et (Hickman et al., 1999) sur lesquels on peut trouver les paramètres de différentes catégories de motorisation pour déterminer le facteur d'émissions correspondant.

Selon les exemples des références citées dans le Tableau 4.1, on constate que l'approche expérimentale a reçu relativement moins d'attention en logistique. En effet, cette approche est plus utilisée pour contrôler les gaz toxiques (NO_x, CO, etc.) émis par le véhicule et sa conformation aux réglementations, par exemple les normes européennes Euro 1 à 4 pour les véhicules unitaires et Euro I à IV pour les camions. Comparativement, l'estimation statistique est préférée du fait de sa facilité d'application. Or, cette méthode risque d'apporter une base mitigée pour ce travail de recherche, car le facteur d'émissions souhaité ici doit se conformer à la catégorie de véhicule choisie et la charge réelle à optimiser. En effet, les références d'émissions estimées par statistique sont exprimées en moyenne du parc de véhicules et ne permettent donc pas d'apprécier l'impact d'un meilleur chargement par exemple. En plus, les facteurs indicatifs comme le taux de chargement ou les trajets à vide sont souvent mal connus alors qu'ils interviennent fortement dans les résultats. En conséquence, **nous choisissons la méthodologie analytique** afin d'élaborer le facteur d'émissions lié au TRM.

Quant aux émissions du transport ferroviaire (TF), les estimations se différencient principalement au niveau de la traction : diesel ou électrique. Evidemment, la traction diesel est plus directement polluante. Par exemple, la branche Fret de la SNCF annonce que leurs locomotives de « *type d'électrique n'émettent pas de gaz à effet de serre*³⁸ ». Or, dans cette thèse l'estimation des émissions des TF inclut aussi les émissions relatives à la production d'énergie utilisée par la traction, notamment l'électricité requise, qui a un bilan très différent si elle est produite à partir de centrales au charbon ou à partir de réacteurs nucléaires. De ce fait, les locomotives électriques ne sont pas nécessairement sans émissions car elles peuvent être « responsables » d'émissions liées à la consommation d'une source d'énergie primaire. La prise en compte des émissions liées à la production de l'énergie utilisée par la traction ferroviaire permet de fournir une estimation plus exhaustive dans une perspective écologique du report modal de la route vers le chemin fer.

On note que le rapport Bilan Carbone (Jancovici, 2007) (p.107) présente des facteurs d'émissions moyens pour le Fret SNCF à partir de ses statistiques internes: 0,0005 et 0,015 kg éq C/tonne.km respectivement pour la traction électrique ou diesel. Or, ces facteurs prennent en compte aussi la fabrication des infrastructures et du matériel roulant qui ne sont pas concernés dans cette recherche du point de vue logistique, il est donc nécessaire de modéliser le facteur d'émissions dans ce cas.

³⁸ http://fret.sncf.com/fret/fret_sncf_transporteur_d_avenir/529-developpement_durable.html

Dans les paragraphes ci-dessus, il a été explicité les choix de modélisation des facteurs d'émissions de CO₂ des TRM et TFM. Nous allons maintenant expliquer comment ces facteurs sont élaborés en nous appuyant essentiellement sur les résultats des projets européens en la matière.

4.1.2 Modélisation du facteur des émissions de CO₂ de transport routier

En ce qui concerne le transport par route des marchandises, la modélisation des émissions de CO₂ s'appuie sur les méthodologies et sur les résultats des projets COST Action 319 (Joumard, 1999) (mis à jour par COST Action 346³⁹ (Sturm et al., 2005)) et du rapport Deliverable 22 du projet MEET (Hickman et al., 1999), qui produisent les résultats fondamentaux pour le logiciel COPERT⁴⁰ (le projet relatif à cette méthode de calcul est présenté dans l'Encadré 4).

³⁹ <http://www.cost.esf.org/library/publications/05-46-Emissions-and-Fuel-Consumption-from-Heavy-Duty-Vehicles-COST-356-Final-Report>

⁴⁰ <http://lat.eng.auth.gr/copert/>

Le projet COPERT (*Computer Programme to Calculate Emissions from Road Transport*), financé par l'AEE (Agence Européenne pour l'Environnement), est un logiciel de calcul des émissions de CO₂ (et des autres gaz polluants) du transport routier. Il intègre les résultats de plusieurs projets européens parmi lesquels les projets COST et MEET qui sont les deux études qui fournissent des résultats fondamentaux, voir (EEA, 1998).

En effet, les projets COST et MEET ont eu pour but d'estimer les polluants issus du transport et ils ont été conjointement menés et réalisés pour le compte de la Commission Européenne. Le programme COST «*European Co-operation in the Field of Scientific Research*», est un projet de recherche en collaboration entre les 25 pays européens. La structure «ouverte» de cette étude a permis de développer un panel très large de sujets de recherche qui ont été défini par les participants et les chercheurs eux-mêmes. C'est dans ce contexte que le projet MEET (*Methodologies for Estimating Air Pollutant Emissions from Transport*) a été créé. Ce projet a été financé par la Commission Européenne et réalisé par 16 participants de différents pays européens. L'objectif a été de définir les facteurs d'émissions des modes de transport tels que la route, le rail (Jorgensen et Sorenson, 1998), le maritime et l'aérien. Les principaux résultats ont été consigné dans le rapport Deliverable 22 (Hickman et al., 1999) et ont finalement été intégré dans le rapport final conjoint du projet COST319 (Joumard, 1999). De fait, les résultats des ces deux projets sont mutuels et complémentaires. En particulier, la partie relative au transport routier des projets a été par la suite adaptée et utilisée dans le calculateur des émissions/ le projet COPERT.

Pour les mises à jour de ces deux projets, on peut se reporter à l'étude EMEP/CORINAIR (EEA, 2007) et pour le transport routier à COST Action 346 ARTEMIS (Sturm et al., 2005).

Encadré 4 : Présentation du projet européen « COPERT »

D'après le rapport Deliverable 22 de MEET (Hickman et al., 1999), la formule générale pour calculer les émissions des polluants émis pour un véhicule roulant (hors fabrication, amortissement, etc.) peut être décrite comme (p.28 dans le rapport Deliverable 22) :

$$E_{total} = E_{chaud} + E_{démarrage} + E_{évaporation} \quad 4.1$$

Où : E_{chaud} (Hot Emissions) représente les émissions quand le moteur est chaud après le démarrage, $E_{démarrage}$ (Start Emissions) désigne les émissions lors du démarrage du moteur ; $E_{évaporation}$ représente les émissions du fait de l'évaporation du carburant. Le CO₂ n'est pas concerné par ce terme $E_{évaporation}$ (p.32 dans (Hickman et al., 1999))

Pour la modélisation des émissions de CO₂ des TRM dans le contexte de la conception des réseaux de distribution de la grande distribution, on peut faire des hypothèses restrictives afin de simplifier les calculs.

H1 : nous considérerons uniquement dans ce travail doctoral que les émissions de CO₂ émis par le moteur chaud, à savoir E_{chaud} (Hot Emissions). En effet, nous faisons l'hypothèse sous-jacente que les transports au niveau des réseaux d'approvisionnement sont souvent sur de longue distance ce qui consiste à négliger les émissions liées au démarrage du véhicule qui n'existent que lorsque le moteur est froid. En conséquence, la formule (4.1) peut être simplifiée et détaillée comme ceci pour les émissions de CO₂ :

$$E_{g/km}^{vide}(v) = E_{chaud} = K + av + bv^2 + cv^3 + \frac{d}{v} + \frac{e}{v^2} + \frac{f}{v^3} \quad 4.2$$

La formule ci-dessus vise à calculer spécifiquement les émissions de CO₂ (en unité de g/km) pour un véhicule non chargé roulant à une vitesse v sur une route sans déclivité (0° gradient), dans laquelle les coefficients (K, a, b, c, d, e, f) sont à déterminer selon la catégorie du véhicule concerné.

H2 : nous considérerons dans cette thèse que le moyen routier à utiliser sera un tracteur routier de la catégorie HDV (Heavy-Duty Vehicle) de 32-40 tonnes PTAC (Poids Total Autorisé en Charge, p.84 dans (Jancovici, 2007)) destiné au transport de marchandises générales. Sachant que les derniers kilomètres de la chaîne logistique qui peuvent recourir à des porteurs ne font pas partis du périmètre d'étude de notre recherche, nous nous limiterons à l'usage du tracteur routier (tracteur et semi remorque), qui est, par ailleurs, le moyen de transport essentiel pour les TRM au niveau de la grande distribution. Une fois que la catégorie de véhicule est connue, les coefficients dans la formule (4.2) peuvent être ainsi déterminés par le tableau A27 dans (Hickman et al., 1999). On en déduit :

$$E_{g/km}^{vide}(v) = 1576 - 17.6v + 0.00117v^3 + \frac{36067}{v^2} \quad 4.3$$

La vitesse reste le seul facteur à déterminer restant dans la formule ci-dessus. D'après le tableau A49 du rapport, la charge et le gradient de la route sont les deux facteurs de correction les plus importants proposés. Ils sont pris en compte en multipliant la formule (4.3).

$$E_{g/km} = E_{g/km}^{vide}(v) \times C_{charge} \times C_{route} \quad 4.4$$

Avec :

$$C_{charge} = \Phi(\gamma, v) = \kappa + n\gamma + p\gamma^2 + q\gamma^3 + rv + sv^2 + tv^3 + \frac{u}{v} \quad 4.5$$

$$C_{route} = \psi(v) = A_6 \cdot v^6 + A_5 \cdot v^5 + A_4 \cdot v^4 + A_3 \cdot v^3 + A_2 \cdot v^2 + A_1 \cdot v^1 + A_0 \quad 4.6$$

Les variables concernées sont la vitesse v et le gradient moyen de route γ . Les coefficients dans (4.5) et (4.6) peuvent se reporter respectivement aux tableaux A46 et A40 dans (Hickman et al., 1999). Le facteur de gradient de route est négligé ici, voir H3 qui suit.

H3 : nous considérons que le gradient de route est de 0%. Selon les coefficients du gradient dans le tableau A40 dans (Hickman et al., 1999), un camion en montrant une pente produit plus de CO₂ par rapport à la route plate, et à l'inverse en descente. Basé sur ce fait, on postule que la somme des émissions d'une grande quantité de livraisons nationales, conduit à un facteur du gradient de route négligeable. Donc la formule (4.4) en intégrant (4.5) et (4.6) peut simplifiée comme ceci :

$$E_{g/km}(\alpha, v) = (1576 - 17.6v + 0.00117v^3 + \frac{36067}{v^2}) \times \left[1 + \alpha \cdot (0.43 - \frac{0.916}{v}) \right] \quad 4.7$$

Dans la formule (4.7) nous avons introduit **la variable α qui signifie le taux de chargement en poids** de camion.

H4 : la vitesse moyenne est fixée à 80 km/h. Le facteur de vitesse sur les émissions de CO₂ est indépendant du chargement qui est le principal facteur étudié ici. Selon la Figure 4.1, la vitesse à 80 km/h qui est près de l'optimum peut être considérée comme la vitesse moyenne pour les camions en route et un écart par rapport à cette valeur génère peut de variation d'émission.

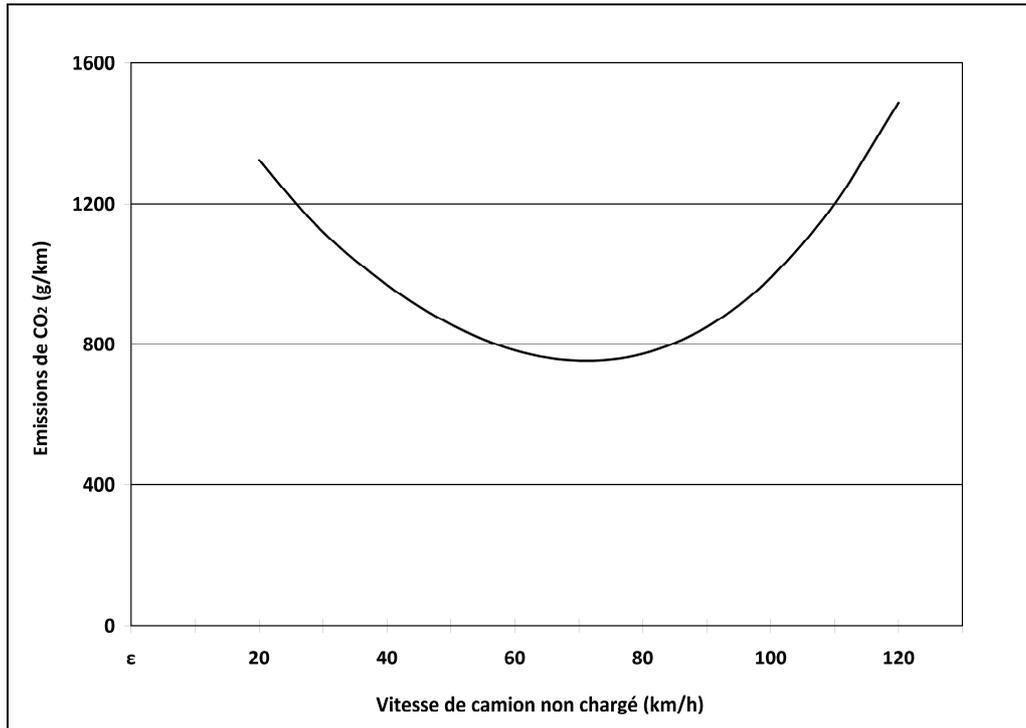


Figure 4.1 : Les émissions de CO₂ en fonction de la vitesse d'un camion roulant à vide

A la suite de la H4, la formule (4.7) peut être davantage simplifiée :

$$E_{g/km}(\alpha) = 772 + 324\alpha \quad 4.8$$

Dès lors, la formule (4.8) ne contient que la seule variable $\alpha=[0,1]$ qui est le taux de chargement de camion. D'où, on peut calculer que pour un camion roulant à vide, $\alpha=0$, $E_{vide}=0.772$ kg/km et pour un camion à pleine charge, $\alpha=1$, $E_{plein}=1.096$ kg/km. Rappelons H2 qui a défini la catégorie de véhicule étudiée de 32-40 tonnes PTAC et pour laquelle la charge utile est de 25 tonnes. Donc, l'efficacité écologique définie comme kg CO₂ / km-tonne est de $\varepsilon_{kg/km-tonne}=0,772+0,013 \times \text{charge utile (en tonne)}$.

Or, il est important de savoir que dans ce travail de recherche les flux sont mesurés en unité de palettes, donc le facteur des émissions de CO₂ mesurées par km-palette est souhaité, de sorte que les fonctions d'optimisation conforment à l'unité de flux. A ce propos, nous devons faire une nouvelle hypothèse sur la capacité de camion.

H5 : pour les produits appartenant aux catégories de poids léger (ex. épicerie), il est fait l'hypothèse que le camion est saturé à la fois en volume et en poids, à savoir un camion est pleinement chargé avec 33 palettes pour un poids total de 25 tonnes ; pour les produits de

poids lourd comme les liquides, le camion est saturé par le poids de 23 palettes pesant 25 tonnes. La quantité de palettes 33 correspond à la capacité en volume d'une remorque standard et 23 est issue de l'expérience des industriels. De là, le facteur des **émissions de CO₂ mesurées par km-palette** est déterminé :

$$\varepsilon_{kg / km-palette}^{léger} = 0.772 + 0.0098x \text{ ou } \varepsilon_{kg / km-palette}^{lourd} = 0.772 + 0.014x \quad 4.9$$

Avec la variable x le nombre de palettes chargées dans un camion.

La fonction d'émission de CO₂ (4.9) examine le cas d'un camion par km. Les émissions pour effectuer une livraison avec une distance et un flux donnés peuvent être calculées selon la formule générique ci-dessous :

$$\varepsilon(d, c, x) = d \cdot \left[\left(\frac{E_{plein} - E_{vide}}{c} \right) \cdot x + E_{vide} \cdot \left\lceil \frac{x}{c} \right\rceil \right] \quad 4.10$$

où x est le nombre palettes transportées, d est la distance en km et c est la capacité de chargement du camion qui varie en fonction du type de produit à transporter ($c=33$ ou 23). Selon la H5, les valeurs des ε_{plein} et ε_{vide} sont identiques pour tout type de produits, donc ce sont des constantes dans la formule. La partie du nombre entier supérieur $\left\lceil \frac{x}{c} \right\rceil$ signifie le nombre de camions nécessaires pour effectuer la livraison et l'autre partie est pour calculer les émissions variables en fonction des charges des camions. **Il est évident que les trajets de retour à vide ne sont pas considérés dans la fonction. Par contre la contrainte sur la capacité de camion est strictement respectée dans le modèle.** Finalement, nous avons la fonction d'émissions de camion :

$$\varepsilon_{camion}^{léger}(d, x) = d \cdot \left(0.00982 \cdot x + 0.772 \cdot \left\lceil \frac{x}{33} \right\rceil \right) \text{ et } \varepsilon_{camion}^{lourd}(d, x) = d \cdot \left(0.00982 \cdot x + 0.772 \cdot \left\lceil \frac{x}{23} \right\rceil \right) \quad 4.11$$

Exemple : calculer les émissions de CO₂ pour transporter un flux de 100 palettes de produits légers entre deux sites ayant la distance de 50 km :

$$\varepsilon(50, 33, 100) = 50 \cdot \left[\left(\frac{1.096 - 0.772}{33} \right) \cdot 100 + 0.772 \cdot \left\lceil \frac{100}{33} \right\rceil \right] = 203.4 \text{ kg}$$

$$\text{pour les produits lourds : } \varepsilon(50, 23, 100) = 50 \cdot \left[\left(\frac{1.096 - 0.772}{23} \right) \cdot 100 + 0.772 \cdot \left\lceil \frac{100}{23} \right\rceil \right] = 263 \text{ kg}$$

Nous avons présenté ci avant une méthodologie pour obtenir les émissions de CO₂ pour les tracteurs routiers. Cette méthode pourrait être généralisée à d'autres d'émissions. Pour les références ayant la valeur la plus proche, on peut se référer aux (Ubeda et al., 2010) et (Graham et al., 2008). La formule (4.10) est la fonction d'émission à optimiser par les modèles. On constate que c'est une fonction linéaire par morceaux du fait de la partie du nombre entier supérieur, voir la Figure 4.2 après.

Une limite de ce travail provient du fait que les études européennes (Hickman et al., 1999) et (Joumard, 1999) sont basées sur les modèles de véhicule avant l'introduction de la directive 91/542/EEC (Euro I). Or le développement de la motorisation modifie les facteurs d'émissions. Mais cette influence est encore peu renseignée, car elle est rarement étudiée spécialement en termes de CO₂. En effet, la concentration des six gaz polluants directs⁴¹ (Commission Européenne, 2007b) qui se conforment aux normes européennes d'émissions (Euro 1 à 6) et qui sont notablement réduits ne concerne pas jusqu'à ce jour le CO₂. Par exemple, l'impact des normes d'émissions sur les GES, notamment le CO₂, peut être négatif en ce qui concerne le CO₂ en comparant Euro V et VI (Commission Européenne, 2007a). De façon directe et au niveau technique, les limites sur les émissions plus strictes demandent de nouvelles technologies sur la motorisation et le post-traitement de l'échappement en procurant éventuellement **une augmentation légère des émissions de CO₂**. Il semble que c'est une conclusion paradoxale et elle peut être expliquée par le fait que le CO₂ n'est pas dans l'objectif de réduction au niveau technique. Comparativement, (Zanni et Bristow, 2009) listent les facteurs d'émissions de CO₂ des tracteurs routiers fabriqués conformément aux Euro I à V et avant, on est surpris de constater que **les camions fabriqués avant la mise en œuvre des normes ont la meilleure performance en CO₂ émis par km**. Une autre remarque est que l'application de l'Euro I a amené une augmentation significative sur les émissions de CO₂. Cela rejoint partiellement l'opinion du (Commission Européenne, 2007a) discuté ci-dessus.

Vu que le contrôle officiel et obligatoire des émissions de CO₂ de véhicule en Europe, récemment certains objectifs de réduction des émissions de CO₂ sont proposés en particulier pour les véhicules des particuliers (*Passenger cars*) et des utilitaires légers (*Light-duty vehicles*), par exemple celui de l'Association des constructeurs européens d'automobiles⁴² et

⁴¹ NO_x, CO, THC, NMHC, THC+NO_x, PM

⁴² http://www.acea.be/index.php/collection/co2_emissions_background/

de l'UE⁴³. Cependant, les véhicules de type HDV pour le transport de fret ne sont pas concernés pour ces objectifs. On peut cependant envisager que les émissions en CO₂ des camions devraient retenir plus d'attention dans les années prochaines.

C'est pourquoi dans la méthodologie de la modélisation des émissions de CO₂ de TR nous nous appuyons sur les rapports des projets MEET et COST pour modéliser les émissions de manière analytique tout en sachant qu'ils minimisent légèrement celles-ci.

4.1.3 Modélisation du facteur des émissions de CO₂ du transport ferroviaire

Le TF est l'autre moyen de transport pris en compte dans ce travail. La performance environnementale de ce moyen peut varier en fonction de la nature de la traction. Avant de développer la modélisation, il est nécessaire d'avertir sur le fait que les résultats de l'analyse sur les émissions de CO₂ de TF seront dépendant du cas français, où 90% de trains liés au fret est équipé de tractions électriques et que l'électricité est produite en grande partie par des moyens décarburés : les centrales nucléaires et hydraulique⁴⁴. En conséquence, dans nos valeurs numériques les trains sont alimentés par une énergie électrique peu carbonée. Certains travaux supposent d'ailleurs que le train électrique n'émet pas de CO₂, mais pour faire une comparaison plus complète de la performance environnementale des TRM et des TFM, notre modèle d'émissions des trains intègre la production d'énergie, tel que proposé par les rapports MEET Deliverable 17 (Jorgensen et Sorenson, 1998) et Deliverable 22 (Hickman et al., 1999) sur lesquels nous nous appuyons.

Concrètement, le calcul des émissions de CO₂ d'un train se fait en deux temps : le calcul de l'énergie nécessaire pour le déplacement du train puis les émissions liées à la production de cette énergie. Fondamentalement, l'émission est donnée par :

$$E_i = WSEC \cdot \frac{Tkm}{Tpt} \cdot BSEF_i \cdot \frac{1}{3.6 \cdot 10^6} \quad 4.12$$

E_i : l'émission du polluant i en kg ;

WSEC : la consommation d'énergie spécifique en KJ/tonne-km ;

⁴³http://europa.eu/legislation_summaries/internal_market/single_market_for_goods/motor_vehicles/interactions_industry_policies/128200_en.htm

⁴⁴http://fret.sncf.com/fret/fret_sncf_transporteur_d_avenir/529-developpement_durable.html

Tkm : les marchandises transportées en tonne-km ;

Tpt : le taux de chargement du train en poids, poids du fret/poids total du train ;

BSEF_i : le taux d'émission direct du polluant *i* en g/kWh d'énergie produite.

La formule (4.12) est une formule corrigée et validée par l'auteur des rapports MEET Monsieur Jorgensen. La formule 4.10 dans (Jorgensen et Sorenson, 1998) et la formule B4 dans (Hickman et al., 1999), dans lequel le multiplicateur $(3,6 \cdot 10^6)^{-1}$ est à tort écrit comme $3,6 \cdot 10^6$. De fait, ce multiplicateur permet la conversion d'unité entre les unités Wh et J. Le polluant *i* est spécifiquement le CO₂ dans ce travail. L'expression fractionnaire est pour calculer les poids totaux (fret plus tare de train) transportés en tonne-km. Ensuite, il faut calculer WSEC et BSEF_{CO₂}. Comme le cas de TR précédent, quelques hypothèses sont nécessaires.

H1 : le train considéré est dans la catégorie de train pour marchandises non pondéreuses (tare totale à 600 tonnes). D'après les expériences sur le TFM, il fait l'hypothèse qu'un train complet est composé d'une locomotive de 70 tonnes et de 26 wagons de type R20 avec tare près de 24 tonnes. La tare totale d'un train complet est alors supérieure à 600 tonnes. Se basant sur la catégorie de train, la formule B9 dans (Hickman et al., 1999) est adaptable :

$$WSEC = \frac{kJ}{\text{tonne} \times \text{km}} = 0.019 \frac{v^2}{\ln x} + 63 \quad 4.13$$

Où *v* est la vitesse moyenne de train et *x* est la distance moyenne entre arrêts.

H2 : la vitesse moyenne et la distance entre arrêts sont respectivement fixées à 100 km/h et à 100km. En conséquence, à partir de la formule (4.13) on peut calculer le WSEC=104,25 kJ/tonne-km qui représente l'énergie nécessaire pour « pousser » 1 tonne à 1 km.

H3 : le taux BSEF_{CO₂} est de 45 g/kWh selon le rapport Bilan Carbone (Jancovici, 2007)⁴⁵. Si l'on ne considère que l'émission de CO₂, le BSEF_{CO₂} dépend de la production d'électricité

⁴⁵ La valeur 45 g/kWh adaptée est issue du Bilan Carbone de version 2003 et elle est mise à jour à 42 g/kWh dans la version 2007. Mais cette version est publiée après cette étude commencée en 2005.

pour les trains électriques. Comme le dit le site⁴⁶, l'électricité utilisée par la SNCF est produite de manière moins polluante, donc on peut prendre la référence de l'EDF qui est le principal fournisseur d'électricité présentée dans le Bilan Carbone. Donc, l'efficacité écologique de train électrique en France peut ainsi être déterminée :

$$\varepsilon_{kg/km-tonne} = 104.25 \frac{kJ}{tonne \times km} \times 45 \frac{g}{kWh} * \frac{1}{3.6 * 10^6} = 0.001303$$

H4 : un train minimal est composé de 13 wagons de type de R20 (taille minimale actuelle des affrètements en demi-train complet), autrement dit la tare pour le train est de 70 (locomotive)+13x24 (R20)=382 tonnes. Donc, les émissions de CO₂ pour un train à vide de 13 wagons par km sont de : $E_{vide}=0,001303 \times 382=0,498$ kg /km

H5 : la saturation d'un wagon ne se fait qu'en volume à savoir un équivalent de 36 palettes⁴⁷. Sachant que le poids des produits varie suivant les familles commerciales (essentiellement produits légers ou lourds), le poids total d'un wagon saturé est différent. En se référant à l'hypothèse 5 de la modélisation sur les TRM, on peut calculer le poids par palette hypothétique. Donc, un wagon saturé pèse $24+36 \times (25/33)=51.3$ tonnes pour les produits légers et $24+36 \times (25/23)=63.1$ tonnes pour les produits lourds.

En conséquence, les émissions de CO₂ pour un train de 13 wagons à pleine charge par km peuvent être calculées :

$$E_{pleine} = 0,001303 \times (70 + 51,3 \times 13) = 0,96 \text{ kg/km (produits légers)}$$

$$E_{pleine} = 0,001303 \times (70 + 63,1 \times 13) = 1,16 \text{ kg/km (produits lourds)}$$

Comparativement à la formule (4.9) pour les TRM, le facteur d'émissions de CO₂ mesurées par kg/km-palette pour les TFM peut être décrit comme ceci :

$$\varepsilon_{kg/km-palette}^{léger} = 0.498 + 0.00099x \text{ ou } \varepsilon_{kg/km-palette}^{lourd} = 0.498 + 0.0014x \quad 4.14$$

Avec la variable x le nombre de palettes dans un train.

⁴⁶ http://fret.sncf.com/fret/fret_sncf_transporteur_d_avenir/529-developpement_durable.html

⁴⁷ http://fret.sncf.com/fret/nos_services_et_offres_commerciales/nos_services_logistiques/notre_catalogue_de_wagons/280-rils_r20_wagons_plats_courants.html

La formule (4.10) est également utilisable pour les TFM et il faut simplement changer les constantes comme les émissions du moyen à vide et à pleine charge, ainsi que la capacité ($c=36 \times 13=468$ palettes pour un train pour tous types de produits dans l'étude). Enfin, nous avons la fonction d'émissions pour les trains électriques :

$$\varepsilon_{train}^{léger}(d, x) = d \cdot (0.00099 \cdot x + 0.498 \cdot \left\lceil \frac{x}{468} \right\rceil) \quad \text{ou} \quad \varepsilon_{train}^{lourd}(d, x) = d \cdot (0.0014 \cdot x + 0.498 \cdot \left\lceil \frac{x}{468} \right\rceil) \quad 4.15$$

La modélisation des émissions de CO₂ du train électrique est ainsi achevée. La fonction d'émissions de train électrique (4.15) révèle qu'elle est une fonction linéaire par morceaux, de même nature que celle de camion, voir la Figure 4.2.

Par rapport au TR, le problème des émissions de CO₂ liées au TF retient relativement moins d'attention, notamment en France, car le parc français de centrales électriques émet très peu de CO₂.

Considérant que la production d'électricité est un facteur décisif pour la modélisation des émissions de CO₂ du train électrique, il est intéressant d'**examiner le cas où le train utilise de l'électricité dont la source d'énergie initiale contient plus de CO₂**, par exemple le charbon. A cet effet, il faut simplement modifier la valeur du BSEF_{CO₂} dans les calculs ci-dessus. Prenons un exemple présenté dans le Bilan Carbone (Jancovici, 2007). Il indique que la SNET (Société Nationale d'Electricité et de Thermique) qui produit de l'électricité principalement avec du charbon a un facteur d'émissions de 1024 g CO₂/kWh en 2003 (958 g CO₂/kWh en 2007). Dans ce cas-là, l'efficacité écologique du TFM est de 29.6 g CO₂/km-tonne, qui est dans la cadre des références mondiales (Dincer et Elbir, 2007). Evidemment, l'électricité produite à base de charbon dégrade notablement la performance écologique des trains à traction électrique, voir la Figure 4.2.

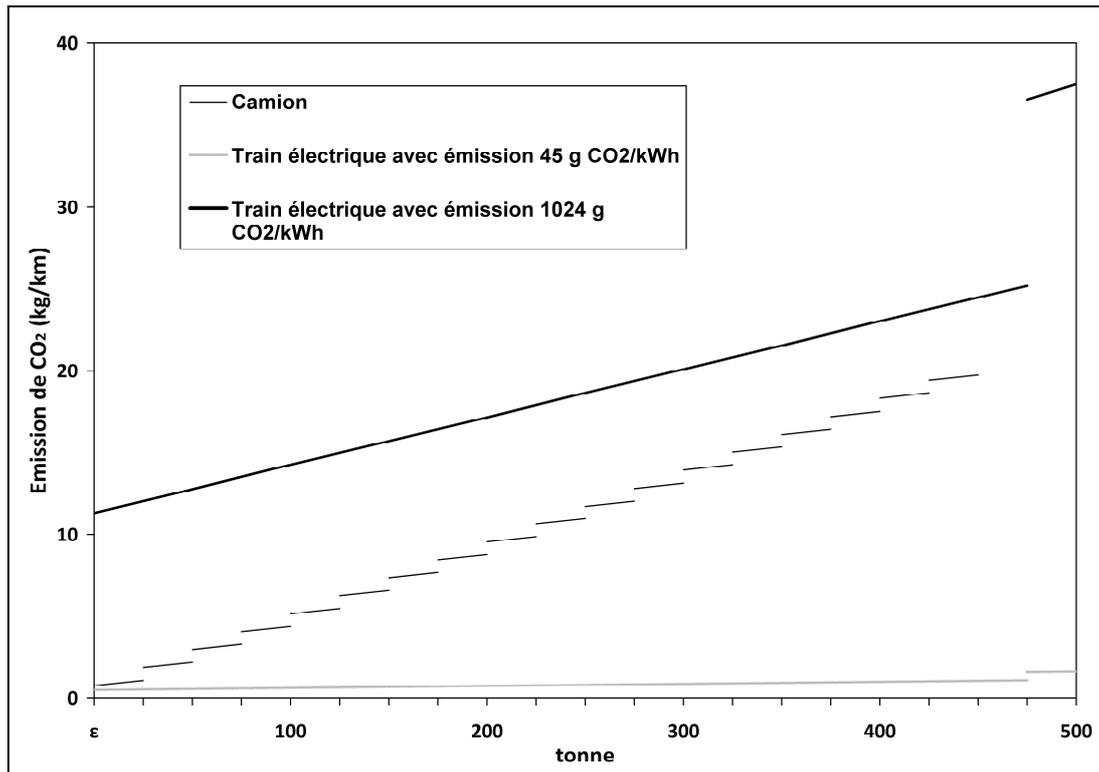


Figure 4.2 : Comparaison des émissions des moyens de transport

La figure ci-dessus est dessinée en faisant l'hypothèse qu'une palette pèse une tonne afin de s'affranchir de l'impact de la densité des produits. On peut constater que les trains mus par une électricité décarbonnée sont nettement moins polluants que les camions de type HDV pour les transports de marchandises. Pour les trains à électricité à base de charbon le rapport n'est plus favorable au train. Naturellement suivant les pays tous les cas de figure intermédiaires peuvent se trouver. Comme indiqué précédemment, il ici fait l'hypothèse que l'électricité pour le train est produite proprement selon le mix de production d'énergie électrique en France, donc le TF est considéré comme un moyen moins émetteur de CO₂ que le TR.

La modélisation des émissions de CO₂ des TRM et TFM ont été obtenues. Ces fonctions sont maintenant à intégrer dans les modèles d'optimisation en lieu et place des fonctions économiques mais qui vont également être présentées ici pour permettre des comparaisons des résultats.

4.2 Modélisation de coûts logistiques

Par rapport aux émissions, les coûts logistiques sont beaucoup plus étudiés dans la littérature. Sur le plan économique, les coûts logistiques hors investissement seront évalués par quatre composantes : le coût de transport, le coût de stockage, le coût de passage de flux par plateforme et le coût d'arrêt de véhicule pour une rupture de charge lors d'une tournée.

4.2.1 Coût de transport

Les deux moyens de transport, le camion et le train, sont retenus pour la modélisation du coût de transport.

4.2.1.1 Coût de transport routier

Pour le TR, l'élaboration du coût est basée sur des grilles tarifaires réelles fournies par les partenaires de l'étude. Dans ces grilles, le tarif d'une livraison est en fonction de deux variables : le nombre de palettes et la distance parcourue. On a la fonction $f(p,d)$ à déterminer, avec p le nombre de palettes et d la distance parcourue. Or, il est nécessaire d'avertir sur le fait que les chargeurs contractent en général un coût de transport par camion avec les transporteurs. Mais nous ici faisons l'hypothèse que le coût de transport est dépendant du volume d'expédition (en palettes), car elle correspond aux principes de la mutualisation : partager le moyen de transport. Nous supposons que, lors d'un partage de moyen, les donneurs d'ordre charge le coût de transport en fonction de leurs flux expédiés.

S'appuyant sur les grilles tarifaires, on peut tracer la courbe du coût moyen pour transporter **un nombre de palettes par km**, comme le montre la Figure 4.3. En tant donné que le coefficient de détermination (R^2) de la courbe est très proche de valeur 1, **on peut faire l'hypothèse que la fonction $f(p,d)$ est purement linéaire pour le transport avec un camion, donc on a $f(p,d)=d(ap+c)$** . Et la valeur de a et c dans la fonction est déterminée par l'analyse de tendance de la courbe dans la Figure 4.3 et les chiffres n'y sont pas montrés, car ce sont des chiffres réels. Lors de la livraison qui a besoin de plusieurs camions, la fonction de coût de transport est en linéaire par morceaux qui conforme à la forme de la fonction d'émissions présentée dans la Figure 4.2.

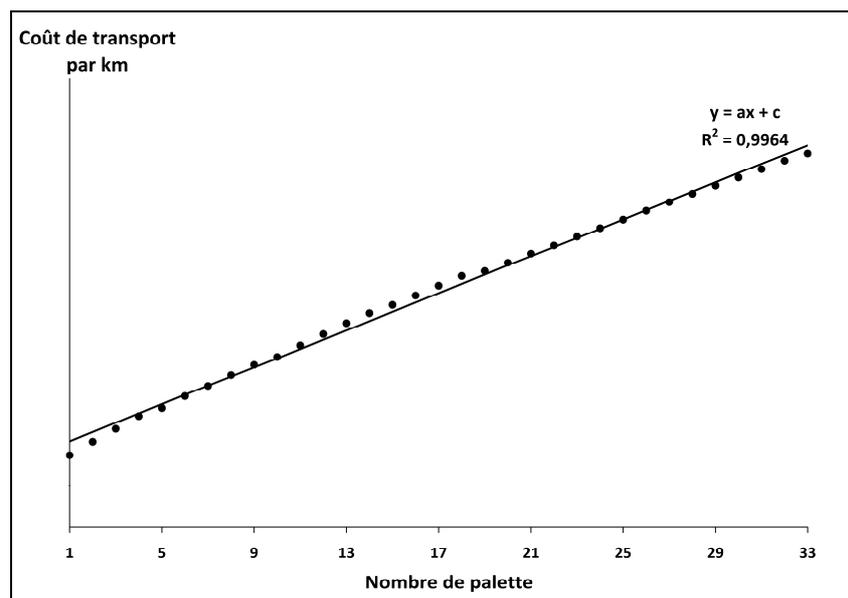


Figure 4.3 : Analyse du coût de transport en fonction du nombre de palettes transportées

La fonction de coût de transport routier est enfin déterminée de manière identique à (4.10). Sachant que le coût de transport est une fonction du nombre de palettes transportées, il est fait l'hypothèse que le tarif de transport pour les produits légers ou lourds est identique, mais le nombre de palettes des produits lourds est limité à 23 pal/camion (voir H5 de la modélisation des émissions de TR). Finalement, on a la fonction de coût de TR :

$$k(d, c, x) = d \cdot \left[\left(\frac{K_{plein} - K_{vide}}{c} \right) \cdot x + K_{vide} \cdot \left[\frac{x}{c} \right] \right] \quad 4.16$$

Avec K_{plein} et K_{vide} respectivement le coût de transport d'un camion complet et vide par km, d la distance parcourue, x le nombre de palettes, et c la capacité de camion ($c=33$ pour les produits légers et $c=23$ pour les produits lourds). D'autres fonctions pourront être testées pour les différents modèles de tarification existants.

4.2.1.2 Coût de transport ferroviaire en France

La modélisation du coût de TFM dans ce paragraphe s'est principalement bâtie sur le tarif public de 2009 de la société française Fret SNCF⁴⁸. Cette société fournit une grille de tarif par wagon en fonction de la distance origine/destination. Selon les produits à transporter et le type de wagon choisi. En s'appuyant sur les tarifs de la grille, on peut élaborer la courbe du coût du TF par wagon en fonction de distance, voir la Figure 4.4. L'analyse de tendance de la

⁴⁸ http://fret.sncf.com/medias/services-offres-commerciales/conditions-commerciales/cc-2010/tarifs_2010.pdf

courbe dans la figure démontre que le tarif par wagon est parfaitement en linéaire avec la distance parcourue ($R^2=1$). Il est donc possible de faire l'hypothèse que la fonction du coût de transport pour un wagon par km est $f(x)=mx+n$ et $m=3.1$ et $n=693$ comme le montre la Figure 4.4. En conséquence, pour un train de 13 wagons, la fonction de coût est $f(x)=40,3x+9009$.

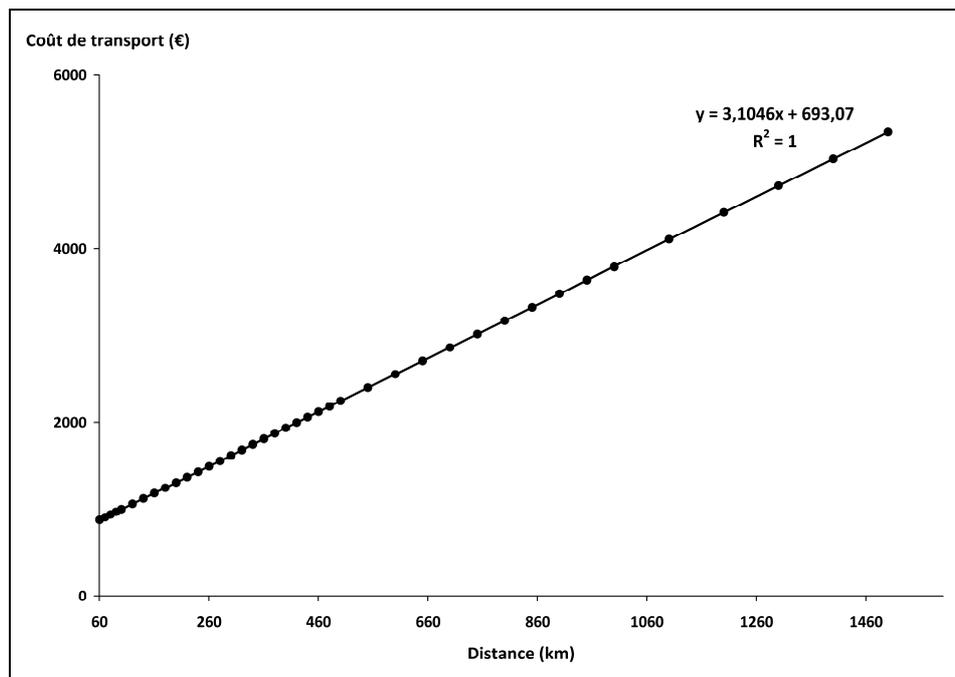


Figure 4.4 : Coût de transport d'un wagon par km (Barème général de transport avec les wagons à plus de 2 essieux ou à bogies de la Fret SNCF 2009⁴⁹)

Le coût élaboré ci-dessus est issu littéralement du tarif public de la Fret SNCF pour les wagons isolés. Toutefois, il ne correspond pas exactement au cas réel où des industriels utilisent les transports ferroviaires. Par exemple, les grands fournisseurs des produits de type liquides, électroménager, etc. de la grande distribution affrètent régulièrement des trains complets. Cela conduit un tarif spécial qui est nécessairement moins cher que celui des wagons isolés : **le tarif des trains complets**. Il est cependant difficile de connaître ce tarif du fait qu'il n'est pas public et est décidé en négociation entre l'industriel et son opérateur de transport ferroviaire. Afin d'élaborer le coût de TF qui s'accorde plus à la réalité de la grande distribution, il est nécessaire de faire l'hypothèse suivante.

On suppose que **le coût de TF soit inférieur à celui de TR pour livrer du fret d'un volume équivalent d'un train complet (468 palettes) à une distance supérieure à 600 km.**

⁴⁹ http://fret.sncf.com/medias/services-offres-commerciales/conditions-commerciales/cc-2010/tarifs_2010.pdf

Avec cette hypothèse, il est possible de tracer une nouvelle courbe de tarif hypothétique en faisant la comparaison du tarif de transport avec des wagons isolés et avec la flotte de camions, voir la Figure 4.5. Comme la détermination des variables a et b dans la figure est fondée sur le tarif du TR issu des industriels, les valeurs ne sont pas indiquées. Mais, il est constatable que la courbe tarifaire de train complet est toujours au-dessous de celle de train de wagons isolés, autrement dit le train complet est beaucoup moins cher et compétitif avec le coût de TR sur les distances importantes. Le coût du TF est identique pour tous les produits pris en compte (légers ou lourds) car le train est toujours saturé en volume pour les produits concernés.

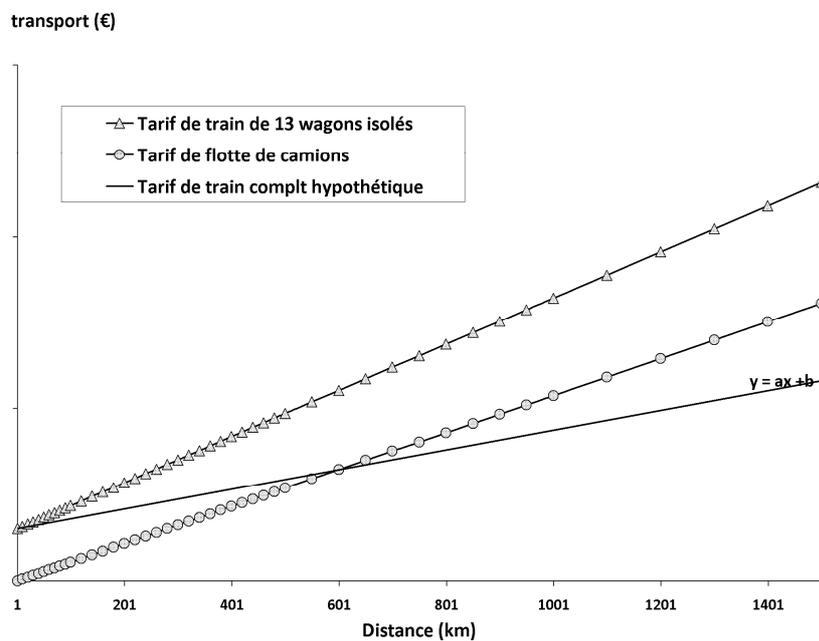


Figure 4.5 : Détermination de la courbe tarifaire de train complet hypothétique

Le coût du TF en train complet connu, on peut élaborer la fonction de coût $f(d,c,x)$ avec les variables d la distance, p le nombre de palettes et c la capacité de moyen. La fonction objectif rejoint ici la forme de la formule (4.16). Rappelons que l'hypothèse sur la capacité de train est toujours retenue. Un train est composé de 13 wagons et de 468 palettes, taille commerciale minimale.

En guise de conclusion, la modélisation du coût des TR des TF a été réalisée.

En terme de valeurs, les données sont en provenance des industriels pour le TR sont cohérentes avec le cas réel. En ce qui concerne le coût du TF, il a été élaboré de façon

hypothétique selon les tarifs connus à ce jour. Cependant si des tarifs plus précis étaient connus ils pourraient remplacer les données actuelles.

Dès lors, la modélisation, d'émissions ou du coût, du transport de marchandises a été achevée. Par rapport aux autres activités logistiques, le transport est de loin le plus sensible aux émissions de CO₂. Mais au niveau économique il existe d'autres composants de coûts importants à analyser, principalement **le coût de stocks**. De plus, afin de comparer différentes opérations de transport, on s'intéressera aussi au **coût de passage des flux par une plateforme logistique et au coût d'arrêt de véhicule**. Ces composants de coûts seront modélisés dans les paragraphes suivants.

4.2.2 Coût des stocks

Après la modélisation du coût de transport, examinons comment le coût des stocks est construit.

Il existe plusieurs composants en termes de stock, par exemple le stock de sécurité, le stock saisonnier, etc., parmi ceux-ci, ce travail se focalise sur le **stock de cycle** (*Cycle Inventory*) qui est décrit comme : le niveau moyen des stocks utilisés pour satisfaire la demande entre la réception des livraisons (le cycle de commande), voir (Chopra et Meindl, 2004), p.57. Sachant que le niveau des stocks de cycle en distribution dépend principalement des conditions d'approvisionnement, que l'on retrouve dans les flux, et des conditions de transport situé au cœur de cette thèse, c'est cette caractérisation des stocks qui a été retenue.

Du fait du périmètre de l'étude, nous avons choisi la méthode proposée dans (Blumenfeld et al., 1985) (cf. aussi (Hall, 1987) et (Bertazzi et al., 1997)). Ce modèle vise à concilier le coût de transport et de stockage afin de minimiser le coût total des deux dans un réseau de distribution en deux échelons *origines-destinations* ou en trois échelons *origines-centre de consolidation-destinations*. Le principe de la méthodologie étudiée dans (Blumenfeld et al., 1985) est d'estimer le temps moyen passé sur chaque site de la chaîne, pour un cycle de commande d'un type de produit. Le temps correspond essentiellement au lot de production, à la taille de livraison et aussi au taux de consommation du produit. En appliquant ce principe à la grande distribution, on peut faire deux hypothèses pour simplifier le calcul.

H1 : il est fait l'hypothèse que la taille de lot de production correspond à la taille d'expédition au niveau du fournisseur. D'une part cette hypothèse est conforme à la logique Juste-à-temps industrielle. D'autre part, comme la taille de lot dépend de la stratégie de production de l'entreprise, il est difficile de la connaître pour chaque fournisseur concerné dans la base de données des études de cas. Cette hypothèse ne revient à comptabiliser que la partie du stock consécutive de l'organisation logistique testée et non l'ensemble des stocks de fabrication dont la logique est indépendante.

H2 : le stock en cours de transport n'est pas pris en compte. Etant donné le périmètre des cas de cette thèse qui s'inscrit dans les réseaux de distribution en France, le temps de transport est négligé.

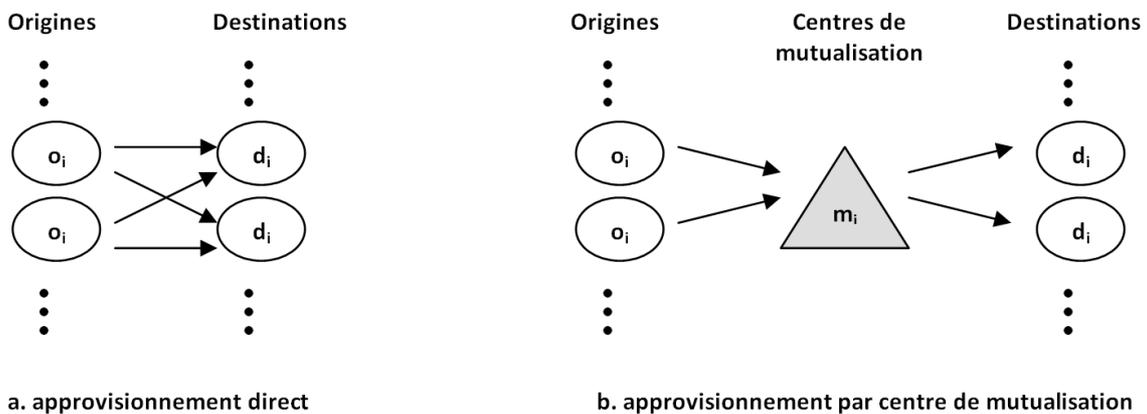


Figure 4.6 : Exemple des réseaux de distribution directe ou avec centre de mutualisation

Pour illustrer la mise en œuvre de cette approche considérons les deux exemples de réseaux de distribution, de la Figure 4.6 l'illustre. Le réseau *a* approvisionne directement depuis chaque fournisseur *O* les sites de destination de distributeur *D*. Le réseau *b* utilise un centre de mutualisation *M* comporte deux segments de transport, amont et aval.

a. pour le réseau direct, suite aux deux hypothèses faites le coût des stocks d'un produit *k* sur les sites *o-d* est :

$$C_{od}^k = P^k R \frac{V_{od}^k}{Q_{od}^k} \quad 4.17$$

Et pour l'ensemble de produits *K* dans le réseau *O-D* dans un horizon de temps (par exemple *n* semaines), le coût des stocks total est :

$$C = \sum_{k \in K} P^k R \sum_{d \in D} \left(\frac{V_{od}^k}{Q_{od}^k} B_d^k \right) \quad 4.18$$

Avec :

K : l'ensemble de produits k ;

O, D : représentent respectivement l'ensemble des sites d'origine o et l'ensemble des destinations d ;

P^k : la valeur de produit k ;

R : le taux de possession par unité de temps;

V_{od}^k : la taille d'expédition du produit k sur l'arc od ;

Q_{od}^k : le flux de demandes du produit k sur l'arc od par unité de temps;

B_d^k : la somme de demandes du produit k au site d dans un horizon de temps (ex : n semaines);

La formule (4.18) est la forme générale pour calculer le coût des stocks total dans les réseaux d'approvisionnement direct. Par rapport aux modèles présentés dans (Blumenfeld et al., 1985), la variable B_d^k est ajoutée ici afin d'obtenir la somme du coût des stocks dans un horizon de temps. Cela correspond au périmètre de l'étude ici qui porte sur le problème de transport de multi-périodes. En général, on en déduit : $B_d^k = \text{nombre de périodes} * Q_{od}^k$.

b. Réseaux d'approvisionnement par centres de mutualisation M, les livraisons sont réalisées en deux étapes : les transports amont origines-centres et aval centres-destinations. Donc le temps passé en stock du produit k dans le réseau s'est composé de trois parties, voir:

$$c^k = P^k R \left(\frac{V_{om}^k}{2Q_{om}^k} + T_c^k + \frac{V_{md}^k}{Q_{md}^k} \right) \quad 4.19$$

Et également, le coût total pour l'ensemble de produits K dans un horizon de temps :

$$C = \sum_{k \in K} P^k R \left[\left(\frac{V_{om}^k}{2Q_{om}^k} + T_c^k \right) \sum_{d \in D} B_d^k + \sum_{d \in D} \frac{V_{md}^k}{Q_{md}^k} B_d^k \right] \quad 4.20$$

Avec :

T_c^k : le temps de consolidation du produit k (le temps passé au centre de consolidation) ;

V_{om}^k ou V_{md}^k : la taille des expéditions consolidées qui contiennent le produit k en amont sur l'arc om ou en aval sur l'arc md . Différemment à l'approvisionnement direct, les expéditions amont ou aval sont consolidées via le centre de consolidation;

Q_{om}^k ou Q_{md}^k : le flux des demandes consolidées par unité de temps qui contiennent le produit k en amont sur l'arc om ou en aval sur l'arc dm . Par exemple, pour une destination d_i qui est affectée au centre de consolidation m_i , la somme des demandes sur l'ensemble de produits K de d_i est regroupée par m_i , ainsi que le flux de demandes.

La première partie de la formule (4.19) est différente de cela de la formule (23) dans (Blumenfeld et al., 1985) en raison de l'hypothèse 1 faite ci-dessus. Puisque les centres de consolidation absorbent les stocks dans le réseau, il est considéré que les produits finis sont livrés immédiatement après la production et, donc, il n'existe pour ainsi dire pas de stock aux sites d'origine. En conséquence, il n'y a que le temps $\frac{V_{om}^k}{2Q_{om}^k}$ en amont avant la consolidation.

Par rapport au réseau direct, l'existence des centres intermédiaires augmente la taille des expéditions et les flux dans le réseau et cela est donc un impact positif sur le transport et éventuellement sur le niveau des stocks. Cependant, il ajoute le temps supplémentaire de la consolidation T_c , temps qui peut être néanmoins très faible dans le cas d'une organisation en Cross-docking.

4.2.3 Autres composants de coûts logistiques

Le coût de transport et des stocks sont les deux composantes les plus importantes des coûts logistiques récurrents (hors investissement). Afin de comparer les différentes organisations du transport, deux autres coûts logistiques ont également été pris en compte. Il s'agit du coût de passage des flux par une plateforme et le coût d'arrêt d'un véhicule dans le cas des tournées.