

Minimisation des émissions du transport par mutualisation des schémas logistiques

SHENLE PAN^{1,2}, ERIC BALLOT¹, FREDERIC FONTANE²

¹ MINES ParisTech, CGS- Centre de gestion scientifique
60 Bd St Michel 75272 Paris Cedex 06, France

² MINES ParisTech, CAOR- Centre de CAO-Robotique, Mathématiques et Systèmes
60 Bd St Michel 75272 Paris Cedex 06, France

SHENLE.PAN@MINES-PARISTECH.FR ; ERIC.BALLOT@MINES-PARISTECH.FR ; FREDERIC.FONTANE@MINES-PARISTECH.FR

Résumé — L’objectif de cette étude est d’évaluer la réduction des émissions de CO₂ liée à la mutualisation des schémas logistiques de la grande distribution en France. Plusieurs travaux de recherche montrent que la consolidation de marchandises au niveau opérationnel est une approche possible mais qu’elle est difficile à mettre en œuvre et qu’elle répond à une démarche opportuniste des transporteurs. C’est pourquoi, nous proposons de tester le potentiel de réduction des émissions de CO₂ quand une mutualisation entre des chaînes logistiques est opérée au niveau stratégique. En se basant sur les données réelles de deux grands distributeurs français, nous évaluerons cette mutualisation au travers d’un modèle d’optimisation et de deux moyens de transport (routier et ferroviaire). L’optimisation des émissions du problème de transport conduit à une fonction linéaire discontinue dont nous proposons une formalisation sous la forme d’un MIP. Les résultats qui seront présentés démontrent que la mutualisation des schémas logistiques peut être un moyen efficace pour réduire les émissions relatives au transport de marchandises. Enfin, nous précisons l’opportunité de recourir au transport ferroviaire.

Mots clés — mutualisation, émission CO₂, transport, distribution, optimisation linéaire mixte, fonction linéaire discontinue.

I. INTRODUCTION

Aujourd’hui, la prise en compte de l’impact sur l’environnement de leur activité est une préoccupation pour les acteurs de la grande distribution. Notamment, ils s’attachent de plus en plus à la réduction des émissions liées à leurs activités de transport. D’après plusieurs travaux de recherches [17, 19, 20], s’appuyant sur la grande distribution, l’efficacité des moyens de transport routier, notamment le taux de chargement, n’est pas satisfaisant et ce malgré les efforts de consolidation réalisés par les prestataires logistiques. On peut donc envisager des gains de réduction des émissions de CO₂ par une organisation du transport différente. L’objectif de cette recherche est d’étudier si la mise en commun de différents moyens logistiques permettrait de réduire de manière significative les émissions de CO₂. Dans ce projet, nous avons étudié l’opportunité de mutualiser des moyens logistiques tels que les plateformes de distribution entre les acteurs de la grande distribution (industriels, enseignes et leurs prestataires). Nos résultats montrent que cette démarche conduit à une réduction sensible des émissions liées au transport en augmentant l’utilisation des ressources mais de manière différenciée suivant les produits et les volumes.

Afin d’améliorer l’utilisation des moyens de transport, la consolidation des flux logistiques est une solution pour

améliorer le taux de remplissage des camions. Récemment, certains sujets de recherche en transport ont montré le potentiel de cette stratégie [2, 3, 9, 21]. Cependant la consolidation au niveau opérationnel, telle que mise en œuvre par les prestataires et les transporteurs reste limitée du fait des contraintes antagonistes qui pèsent sur eux. Les taux de remplissages (de l’ordre de 70%) constatés par les études [17, 19] et retrouvées dans nos données [8] en témoignent. Pour trouver une autre source d’économie d’échelle, nous faisons l’hypothèse qu’au-delà du moyen de transport, la mutualisation au niveau des chaînes logistiques, autrement dit la consolidation entre ces chaînes peut être également efficace pour réduire l’émission CO₂, voir [11]. Cette approche basée sur les données issues de la grande distribution française est présentée au paragraphe II. Un modèle de minimisation des émissions sous la forme d’un MIP a été développé et sa résolution sera présentée en III avant d’en présenter et d’en discuter les résultats.

II. METHODOLOGIE

A. La chaîne logistique de la grande distribution

Ce projet de recherche a été mené en collaboration avec le club *Déméter* pour la logistique (www.club-demeter.fr) qui nous a fourni les données concernant les flux de marchandises sur 12 semaines de deux grandes enseignes nationales, ainsi que la localisation des entrepôts ou des usines des cents premiers fournisseurs et les plateformes des distributeurs destinataires de ces flux.

Ces données permettent d’étudier l’apport d’une mutualisation des flux depuis les entrepôts ou les usines des fournisseurs (WH) vers les centres de distribution (DC). Afin de mutualiser les moyens (WH ou DC) et donc leurs flux, des lieux de regroupement en amont et en aval ont été rendus possibles parmi les WH et DC existants. Nous faisons l’hypothèse que la densité des lieux logistiques et leur localisation permet de trouver la solution parmi les lieux actuels. La mutualisation de la distribution est ici représentée par trois échelons : le flux en amont du fournisseur (WH) au centre de regroupement amont (hub amont) ; le flux intermédiaire du hub amont au centre de regroupement de distribution (hub aval), puis du hub aval au centre de distribution de l’enseigne (DC). Les points potentiels de consolidation sont les hubs amont et aval (figure 1). Il faut noter en outre qu’il s’agit d’un schéma de principe qui n’exclut pas des trajets directs et qui n’implique pas nécessairement de

rupture de flux supplémentaire (les hubs étant localisés sur les zones logistiques des WH et des DC).

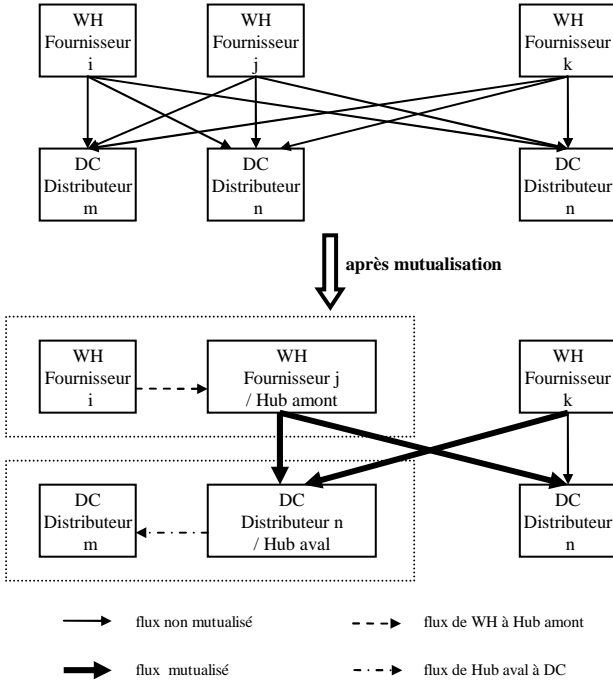


Figure 1. La mutualisation de chaînes logistiques

L'objectif du programme de minimisation des émissions sera donc de consolider plusieurs milliers de flux qui partent des fournisseurs vers les centres régionaux de distribution.

B. Construction des données

Les données mentionnées précédemment portent sur les flux des 106 premiers (les plus importants en volume) fournisseurs communs à deux grandes enseignes de la grande distribution française. Les flux de cette base de données sont mesurés en nombre de palette (équivalent palette complète). Cette base de données a été décomposée suivant deux principes.

Premièrement, les flux sont divisés en trois groupes selon les familles de produit traités : DPH (droguerie, parfumerie et hygiène), EP (épicerie) et LIQ (liquides). Cette division est fondée sur le fait que ces familles de produits n'ont pas le même comportement logistique et sont souvent non mélangées au niveau de la chaîne logistique, par exemple, un entrepôt de liquide n'est pas conçu pour traiter les produits de la parfumerie. Il y a en outre des incompatibilités entre produits à respecter (odeur, risque santé, etc.).

Deuxièmement, les fournisseurs dans chaque famille sont de plus divisés en trois groupes en fonction de l'importance des flux de leurs produits. En effet, une première étude de cas sur ces mêmes données [8] a montré qu'il n'était pas envisageable de mélanger des volumétries trop différentes. En équilibrant le nombre de fournisseur dans chaque groupe, les bornes volumique des groupes sont 0-200, 200-600 et >600 palettes par semaine et fondée sur une moyenne des flux sur 12 semaines en sortie des fournisseurs. Par conséquent, le problème est décomposé en 9 sous problèmes et le nombre de fournisseur dans chaque sous problème est présenté dans Table 1, aspect qui réduira également la taille des problèmes d'optimisation.

	DPH	EP	LIQ
Groupe pal<200	8	25	21
Groupe pal=200-600	9	29	25
Groupe pal>600	13	27	34

Table 1. Nombre de fournisseur dans les groupes des familles de produit

III. MODELISATION

Pour minimiser les émissions, il convient de définir une fonction d'émission. Celle-ci s'appuiera sur l'émission du CO₂, principal gaz à effet de serre émis par le transport.

A. Emissions de CO₂

Dans ce projet, deux types de transport sont pris en compte, la route et le ferroviaire. L'émission en CO₂ de ces moyens est calculée selon les fonctions publiées dans les rapports du projet MEET [12, 14] et du projet COST 319 [15]. Par ailleurs, les facteurs d'émission français utilisés dans le calcul proviennent des rapports de l'ADEME [7, 13, 20]. Ces émissions exprimées initialement par rapport aux tonnes transportées sont ramenées pour cette étude à une fonction du nombre de palette. Dans cette section, nous allons présenter synthétiquement les fonctions d'émission retenues ainsi que les hypothèses relatives à notre modélisation.

1. Emissions du transport routier

Le moyen routier considéré ici est un camion avec remorque dans la catégorie HDV (32-40 tonnes) destiné au transport de marchandises générales. Les fonctions des rapports [12, 13], permettent de calculer les émissions de CO₂ pour un camion vide et à pleine charge qui sont respectivement 0.772 kg/km et 1.096 kg/km. La fonction d'émission en kg de CO₂ est établie comme suit :

$$\varepsilon_v(d, x) = d \cdot \left(0.00982 \cdot x + 0.772 \cdot \left[\frac{x}{c} \right] \right) \quad (1)$$

où x est le nombre palette transportée, 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.

Les principales hypothèses sont :

- la vitesse moyenne par route est fixée à 80 km/h ;
- le facteur de la pente est négligé ;
- pour les produits appartenant aux catégories DPH et 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 totale de 25 tonnes. Pour les liquides, le camion est saturé par le poids de 23 palettes pesant 25 tonnes. Le coefficient d'émission lié à la charge est donc variable et passe de 0.00982 à 0.014 pour les liquides du fait de la densité des produits.

2. Emissions du transport ferroviaire

Selon le site du Fret SNCF (www.fret.sncf.com), en France 90% des locomotives Fret sont des tractions électriques. C'est la raison pour laquelle seulement le train alimenté par l'énergie électrique sera pris en compte dans ce projet. Le calcul des émissions 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. L'émission est donnée par :

$$E_i = WSEC \cdot \frac{Tkm}{Tpt} \cdot BSEF_i \cdot \frac{1}{3.6 \cdot 10^6} \quad (2)$$

Où E_i : l'émission du polluant i en kg ;
WSEC: la consommation d'énergie spécifique en KJ/tonne-km ;
Tkm : le chargement transporté en tonne ;
Tpt : le taux de chargement du train en poids du fret sur le poids total du train ;
BSEFi : le taux d'émission direct en g/kWh d'énergie produite.

La formule (2) est une formule corrigée et validée par l'auteur du rapport MEET [14]. La méthode pour calculer la valeur de WSEC repose sur deux hypothèses : la distance moyenne entre les arrêts et la vitesse moyenne. Si l'on ne considère que l'émission de CO₂, le BSEFco₂ dépend de la production d'électricité. D'après le bilan carbone en France de l'ADEME [13], la valeur de BSEFco₂ en 2007 est de 42 g/kWh pour EDF qui est le principal fournisseur d'électricité. Finalement l'émission de CO₂ du transport ferroviaire est donnée par l'équation suivante :

$$\varepsilon_i(d, x) = d \cdot (0.00099 \cdot x + 0.498 \cdot \left\lceil \frac{x}{468} \right\rceil) \quad (3)$$

L'équation (3) comporte les hypothèses suivantes :

- la vitesse moyenne des trains est fixée à 100 km/h ;
- un train est composé de 13 wagons de type de R20 (taille minimale actuelle des affrètements en demi train complet) ;
- la distance entre arrêts est de 100 km.
- comme la capacité en poids des wagons de type R20 est de 56 tonnes/wagon, la saturation d'un wagon se fait en volume à savoir un équivalent de 36 palettes. Comme le poids des produits varie suivant les familles commerciales, la pente de l'équation (3) est correspondante aux DPH et à l'épicerie. Pour les liquides, il convient de changer de 0.00099 par 0.0014.

En faisant l'hypothèse qu'une palette pèse 1 tonne, la figure 2, qui montre la comparaison des émissions des deux types de transport, souligne que le moyen ferroviaire est très intéressant dans le cas où la production d'électricité repose sur des moyens peu émetteurs de CO₂.

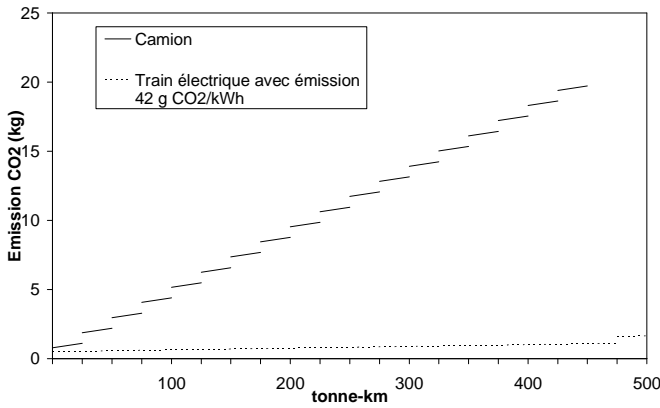


Figure 2. Comparaison des émissions des moyens de transport

En raison de la partie entière supérieure de x/c , les équations (1) et (3) sont des fonctions linéaires par morceau non convexes qui sont le fondement du modèle d'optimisation linéaire mixte, qui va être présenté à la section suivante.

B. Modèle d'optimisation

L'objectif de notre problème d'optimisation est de minimiser les émissions de CO₂ dans une chaîne logistique représentative de la grande distribution. Comme la fonction d'émission est linéaire par morceau nous devons traiter un problème de

transport de type *Mixed Integer Linear Programming* avec une fonction objectif discontinue.

1. Formulation

Pour représenter une fonction linéaire par morceau, un article de Croxton [4] démontre qu'il existe au moins trois formalisations qui sont équivalentes en termes de complexité ou de temps de calcul. Ces formalisations sont IM (*Incremental Model*), MCM (*Multiple Choice Model*) et CCM (*Convex Combination Model*). Un article concernant le problème du sac à dos [16] conduit à la même conclusion. La formulation MCM est adoptée pour ce travail de recherche car les émissions sont fonction de la somme de la charge de palette x passant par un arc.

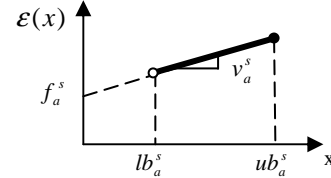


Figure 3. Définition des paramètres d'émission $\varepsilon(x)$

Telle que mentionné dans le paragraphe II, la mutualisation est réalisée au niveau d'une chaîne logistique à 3 maillons. Cela nous conduit à un problème de minimisation de la somme des émissions des trois maillons (amont, intermédiaire et aval). Le problème d'optimisation sur une semaine et un seul moyen de transport se formule donc ainsi (la figure 3 précise les notions):

$$\text{Min} \sum_{om \in A_u} [d_{om} \cdot \varepsilon(x_{om}^s)] + \sum_{mn \in A_m} [d_{mn} \cdot \varepsilon(x_{mn}^s)] + \sum_{nd \in A_d} [d_{nd} \cdot \varepsilon(x_{nd}^s)]$$

$$\text{avec} \quad \varepsilon(x_a^s) = \begin{cases} 0; & x_a^s = 0; \\ f_a^s y_a^s + v_a^s x_a^s; & \text{si non} \end{cases} \quad (5)$$

Variables de décision:

x_a^k : quantité de flux de produit $k \in K$ sur l'arc $a \in A$;

p_{om}^k : variable binaire avec $p_{om}^k = 1$ si le flux du produit k qui part de WH o arrive à l'hub amont m ; sinon 0 ;

q_{nd} : variable binaire avec $q_{nd} = 1$ si le DC d est servi par l'hub aval n ; sinon 0 ;

Sous les contraintes:

$$x_a^s = \sum_{k \in K} x_a^k, \quad \forall a \in A, \forall s \in S_a \quad (6)$$

$$lb_a^s y_a^s < x_a^s \leq ub_a^s y_a^s, \quad \forall a \in A, \forall s \in S_a \quad (7)$$

$$\sum_{s \in S_a} y_a^s \leq 1, \quad \forall a \in A \quad (8)$$

$$y_a^s \in \{0,1\}, \quad \forall a \in A, \forall s \in S_a \quad (9)$$

$$x_a^k \geq 0; \quad \forall a \in A, \forall k \in K \quad (10)$$

$$\sum_{m \in M} x_{om}^k = R_o^k, \quad \forall k \in K, \forall o \in O \quad (11)$$

$$\sum_{n \in N} x_{nd}^k = B_d^k, \quad \forall k \in K, \forall d \in D \quad (12)$$

$$\sum_{o \in O} x_{om}^k = \sum_{n \in N} x_{mn}^k, \quad \forall k \in K, \forall m \in M \quad (13)$$

$$\sum_{m \in M} x_{mn}^k = \sum_{d \in D} x_{nd}^k, \quad \forall k \in K, \forall n \in N \quad (14)$$

$$\sum_{m \in M} p_{om}^k = 1, \quad \forall k \in K, \forall o \in O \quad (15)$$

$$p_{om}^k \in \{0,1\}, \quad \forall k \in K, \forall o \in O, \forall m \in M \quad (16)$$

$$\sum_{n \in N} q_{nd} = 1, \quad \forall d \in D \quad (17)$$

$$q_{nd} \in \{0,1\}, \quad \forall n \in N, \quad \forall d \in D \quad (18)$$

Notations:

K : un ensemble de produits qui ont chacun au moins une origine et une destination;

O, M, N, D : représentent respectivement l'ensemble des entrepôts (WH), des hubs amont, des hubs aval et des centres de distribution (DC);

Au, Am, Ad : sous-ensembles de l'ensemble des arcs A avec Au l'ensemble des arcs amonts, Am intermédiaires et Ad avals;

a : arc élément des sous ensemble présenté ci-dessus $a \in A$;

dij : distance d'un arc d'origine i et de destination j avec $ij \in A$;

$\varepsilon(x)$: fonction linéaire par morceau représentant l'émission de CO_2 du flux x ;

R_o^s : quantité du produit $k \in K$ fourni au nœud de source $o \in O$;

B_d^s : quantité du produit $k \in K$ demandé au nœud de destination $d \in D$;

S_a : représente le nombre de segment sur chaque arc $a \in A$;

s : segment linéaire de la fonction $s \in S_a$ pour chaque arc $a \in A$;

f_a^s : valeur fixée et non négative de l'interception du $s \in S_a$ pour l'arc $a \in A$, dans ce problème les segments sont parallèles et identiquement décalés pour le même moyen de transport, 0.772 et 0.489 respectivement pour le transport routier et ferroviaire;

v_a^s : pente du segment $s \in S_a$ sur l'arc $a \in A$. Les segments sont parallèles avec $v_a^s = 0.00982$ pour les produits de DPH et d'épicerie et $v_a^s = 0.0141$ pour les liquides en transport routier, quant au transport ferroviaire, ce sont de 0.00099 pour les DPH et épicerie, et de 0.0014 pour les liquides;

y_a^s : variable binaire de chaque arc $a \in A$, avec $y_a^s = 1$ si le segment s contient un flux non nul, et $y_a^s = 0$ sinon;

lb_a^s et ub_a^s : borne inférieure et supérieure du flux total du segment $s \in S_a$ en chaque arc. En particulier pour chaque arc $a \in A$ on suppose que $lb_a^1 = 0$ et $ub_a^6 = +\infty$; et également que pour chaque segment s , $ub_a^s - lb_a^s = W_c$ (qui représente la capacité du moyen et qui prend en compte la densité des palettes ainsi que la surface du moyen de transport);

x_a^s : le flux total sur l'arc $a \in A$ si ce flux est dans le segment $s \in S_a$ et $x_a^s = \sum_{k \in K} x_a^k$.

Les contraintes 6-10 s'appuyant sur le modèle MCM [4] assurent que le flux total des produits sur un arc se situe sur un et au plus un segment. Avec les contraintes 11-14, la quantité de produit dans chaque maillon de la chaîne logistique est conservée et satisfait la demande finale. Les quatre dernières contraintes représentent l'hypothèse qu'il existe au plus un hub amont pour un fournisseur et un centre de distribution est servi par au plus un hub aval. Cela permet de simplifier la gestion des flux dans chaque centre de stockage de produit. Lors de la mise en compétition des deux modes de transport, la fonction objectif et les variables de flux sont dédoublées. Une contrainte minimale sur la taille des envois ferroviaires est ajoutée.

2. Résolution du problème d'optimisation

Puisque le problème de MILP est un problème *NP*-difficile [1], le calcul peut être compromis par la taille de problème. Quant au nombre de variable qui représente un facteur important de complexité de ce genre de problème, il atteint 23000 variables dans certains des cas présentés. Afin de le résoudre, nous faisons certaines hypothèses pour réduire la complexité du problème ainsi que le nombre de variable à traiter :

- La fonction d'émission est linéaire par morceau, et est non convexe. Le nombre de segments (à savoir les variables entières) dépend alors de la taille du flux. Or il a été démontré par des travaux sur l'efficacité de la fonction linéaire par morceau [6, 16, 18], que la continuité, le nombre de segment et la convexité influent d'une manière remarquable sur le temps de calcul. Cela nous conduit à simplifier la fonction avec l'hypothèse que le camion sera toujours complet au-delà d'un volume représentant un équivalent de 5 camions par semaine, ainsi le nombre de segment dans le cas de moyen de camion est de dimension 6, $S_a=6$ et $s=<6$; de même que la pente du segment 6 ($s=6$) est de 0.3321 pour les familles DPH et épicerie et de 0.476 pour les liquides. D'une manière similaire pour le moyen ferroviaire, considérant la capacité importante d'un train et son faible niveau d'émissions de CO_2 , la fonction est réduite à deux segments représentant l'émission du premier train puis celle des trains toujours complets.
- Comme nous sommes en capacité de borner les flux sur chaque relation, nous pouvons donc limiter le nombre de variable binaires sur chaque flux par des coupes supplémentaires en se référant au travail de Croxton [5].
- Au niveau du rayon de sélection pour le regroupement : sachant que les hubs amont et aval sont respectivement dans l'ensemble des WH et des DC, il a été fait l'hypothèse que le point de mutualisation entre fournisseurs ou entre distributeurs destinataires ne pourrait pas se trouver à plus d'une certaine distance du point source du flux afin encore une fois de limiter le nombre de variables. Par contre pour éviter une sous optimisation, la distance de 100 km est prise après une étude du temps de la résolution et de la qualité de la solution en fonction du rayon de regroupement.

3. Borne inférieure des émissions

Au delà de la résolution du problème d'optimisation présenté, il peut être intéressant de calculer une borne inférieure des émissions représentée par des trajets directs entre WH et DC qui saturent le moyen de transport. Le programme d'optimisation (5) précédent est alors remplacé par une optimisation avec une fonction objectif linéaire.

Avec le modèle d'optimisation et les hypothèses de réduction de nombre des variables, le problème présenté a pu être résolu. Les résultats relatifs à la diminution des émissions de CO_2 sont présentés dans le paragraphe suivant.

IV. RESULTATS ET DISCUSSION

Les résultats proviennent d'une machine Quad CPU Q6700 (2.66 GHz et 4 GB RAM). Le problème de transport est modélisé dans le logiciel OPL 6.0 d'ILOG et est résolu via le moteur d'optimisation CPLEX 11 avec un écart inférieur à 3%. Les valeurs des émissions dans les tableaux de résultats présentés ci-après sont mesurées en tonne. De même, nous rappelons que les fournisseurs ont été segmentés en trois

groupes : Groupe A < 200 palettes/semaine, Groupe B 200-600 palettes/semaine et Groupe C > 600 palettes/semaine.

1. Transport routier

Dans un premier temps, le transport routier est le seul moyen de transport pris en compte. L'objectif est d'évaluer la performance de la mutualisation de schémas logistiques en termes de réduction des émissions de CO₂ sur les 9 sous problèmes mentionnés en les comparant aux émissions actuelles. Ainsi, dans les tableaux de résultats nous mentionnons les émissions actuelles sur la base des flux non mutualisés, les émissions / mutualisation basées sur les flux du programme (5) et enfin les émissions minimales représentant le gain maximal en termes de réduction des émissions lorsque tous les camions sont saturés (émissions linéaires).

Groupes des fournisseurs DPH	A	B	C	Σ
Emissions actuelles	51	93	319	463
Emissions / mutualisation	28	62	290	380
Diminution Absolue	23	31	29	83
Relative	45%	33%	9%	18%
Emissions minimales	11	45	266	322
Diminution Absolue	40	48	53	141
Relative	78%	52%	17%	30%

Groupes des fournisseurs EP	A	B	C	Σ
Emissions actuelles	132	309	670	1111
Emissions / mutualisation	67	219	628	916
Diminution Absolue	65	90	42	195
Relative	49%	29%	6%	18%
Emissions minimales	29	147	568	744
Diminution Absolue	103	162	102	736
Relative	78%	52%	15%	33%

Groupes des fournisseurs LIQ	A	B	C	Σ
Emissions actuelles	183	291	1257	1731
Emissions / mutualisation	93	255	1193	1541
Diminution Absolue	90	36	64	190
Relative	49%	12%	5%	11%
Emissions minimales	39	177	1134	1350
Diminution Absolue	144	114	123	381
Relative	79%	39%	10%	22%

Table 2. Emissions de transport routier en une semaine (tonne CO₂)

Ces résultats montrent que la mise en œuvre d'une mutualisation des schémas logistiques conduit à une diminution significative des émissions. Nous pouvons conclure que cette démarche de mutualisation conduit pratiquement dans tous les cas étudiés à parcourir « la moitié du chemin » depuis la situation actuelle vers le gain maximal théorique défini par la borne inférieure. Néanmoins, nous pouvons remarquer que pour le groupe de fournisseurs C, la diminution des émissions relatives à une démarche de mutualisation est moins importante que pour les deux autres groupes de fournisseurs. Ce résultat s'explique aisément par les massifications déjà mises en œuvre par ces fournisseurs à fort volume afin de saturer leurs moyens de transport.

2. Transport conjoint routier et ferroviaire

Dans cette section, nous cherchons à montrer que l'utilisation conjointe de moyens routiers et ferroviaires conduit à une diminution plus importante des émissions de CO₂. Afin de prendre en compte les pratiques actuelles du transport ferroviaire nous avons choisi de traiter les flux supérieurs à 468 palettes (à savoir un demi train complet soit 13 wagons).

Groupes des fournisseurs DPH	A	B	C	Σ
Emissions actuelles	51	93	319	463
Emissions / mutualisation	29	44	157	230
Diminution Absolue	22	49	162	233
Relative	43%	53%	51%	50%

Groupes des fournisseurs EP	A	B	C	Σ
Emissions actuelles	132	309	670	1111
Emissions / mutualisation	67	210	257	534
Diminution Absolue	65	99	413	577
Relative	49%	32%	62%	52%

Groupes des fournisseurs LIQ	A	B	C	Σ
Emissions actuelles	183	291	1257	1731
Emissions / mutualisation	93	247	471	812
Diminution Absolue	90	44	785	919
Relative	49%	15%	62%	53%

Table 3. Emissions de transport routier ou ferroviaire en une semaine (tonne CO₂)

Les résultats de la table 3 montrent, notamment pour les fournisseurs appartenant au groupe C, que l'utilisation conjointe des moyens routier et ferroviaire est un procédé très efficace pour diminuer les émissions du fait des faibles émissions des trains. L'intérêt de la mutualisation réside dans l'obtention de volumes suffisants à la fois pour charger des ½ trains et pour respecter les volumes de livraison hebdomadaires, c'est-à-dire sans remettre en cause les niveaux des stocks des distributeurs.

V. CONCLUSION

Ce travail de recherche montre l'impact de la mutualisation des schémas logistiques des acteurs de la grande distribution sur les émissions de CO₂ conséquentes aux flux permettant de réapprovisionner les plateformes de deux enseignes françaises. Pour cela nous avons souligné que la consolidation de commandes au niveau opérationnel correspond bien souvent à une optimisation locale et ponctuelle opérée par un prestataire afin de mieux utiliser ses moyens de transport. C'est pourquoi, nous sommes intéressé à la mutualisation des schémas logistiques des acteurs (industriels, enseignes) de la chaîne logistique de la grande distribution. Cette démarche qui s'opère à un niveau plus stratégique représente une coordination plus complète et à plus long terme [10] entre ces acteurs afin de réduire le bilan carbone lié aux activités de transport de cette chaîne logistique.

Pour cela, nous avons collaboré avec le *Club Déméter* afin d'identifier les principes de mutualisation pertinents. Dans cet article, nous présentons un axe de mutualisation géographique inter fournisseurs et inter distributeurs. Pour évaluer quantitativement la réduction potentielle des émissions de CO₂

si une telle mutualisation était mise en œuvre, nous avons développé un modèle d'optimisation dont la fonction objectif est une fonction d'émissions. Afin de tester ce modèle, nous avons utilisé les données réelles des expéditions reçues sur les plates formes nationales pendant 12 semaines de deux grands distributeurs français. Au regard de la taille du problème en nombre de variables (supérieure à 100 000) nous avons fait des hypothèses afin de réduire cette complexité et de trouver des transformations du problème permettant sa résolution en quelques minutes à moins de 3% d'écart dans tous les cas. Les résultats que nous obtenons au niveau de la réduction des émissions de CO₂ lorsque l'on met en œuvre ce principe de mutualisation par rapport à la situation actuelle, montrent que ce principe est pertinent. En n'utilisant que des moyens routiers une réduction globale de 14% des émissions est possible sans changer le service offert aux enseignes. De plus nous démontrons que l'utilisation conjointe de moyens routiers et ferroviaires en France conduit à une réduction globale de 52% des émissions de CO₂ en ne considérant que deux enseignes.

Il faut néanmoins noter que ce premier travail ne prend pas en compte certains facteurs de cette chaîne logistique comme la capacité d'entreposage, les parcours à vide des camions, ainsi que les contraintes de transport au niveau opérationnel.

Ce travail de recherche va donc se poursuivre notamment en intégrant une dimension économique à savoir le coût du transport et celui des ruptures de charge. L'impact en termes de fréquences de livraison, d'impact sur les stocks ou d'organisation de plateformes multi clients restent également des axes de recherche.

VI. REMERCIEMENTS

Nous remercions ici le *Club Déméter* qui nous a fourni les supports sur notre recherche, ainsi que le programme R2DS de la Région Ile-de-France qui finance ce projet de recherche.

VII. REFERENCES

- [1] R. K. Ahuja, T. L. Magnanti, and J. B. Orlin, *Network flows: theory, algorithms, and applications*: Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River, NJ, USA, 1993.
- [2] J. H. Bookbinder, and J. K. Higginson, "Probabilistic modeling of freight consolidation by private carriage," *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 38, no. 5, pp. 305-318, 2002.
- [3] R. K. Cheung, J. H. Tong, and B. Slack, "The transition from freight consolidation to logistics: the case of Hong Kong," *Journal of Transport Geography*, vol. 11, no. 4, pp. 245-253, 2003.
- [4] K. L. Croxton, B. Gendron, and T. L. Magnanti, "A Comparison of Mixed-Integer Programming Models for Nonconvex Piecewise Linear Cost Minimization Problems," *Management Science*, vol. 49, no. 9, pp. 1268-1273, 2003.
- [5] K. L. Croxton, B. Gendron, and T. L. Magnanti, "Models and Methods for Merge-in-Transit Operations," *Transportation Science*, vol. 37, no. 1, pp. 1-22, 2003.
- [6] K. L. Croxton, B. Gendron, and T. L. Magnanti, "Variable Disaggregation in Network Flow Problems with Piecewise Linear Costs," *Operations Research*, vol. 55, no. 1, pp. 146-157, 2007.
- [7] C. De Boissieu, *Rapport du Groupe de travail« Division par quatre des émissions de gaz a effet de serre de la France à l'horizon 2050» sous la présidence de Christian de Boissieu*, 2006.
- [8] E. Ballot, and F. Fontane, "Reducing greenhouse gas emissions through the collaboration of supply chains: lessons from French retail chains," in *International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain*, Madison, Wisconsin, 2008.
- [9] O. Ergun, G. Kuyzu, and M. Savelsbergh, "Reducing Truckload Transportation Costs Through Collaboration," *Transportation Science*, vol. 41, no. 2, pp. 206-221, 2007.
- [10] J. Francois, "Planification des chaînes logistiques : modélisation du système décisionnel et performance," Université Sciences et Technologies, Bordeaux I Bordeaux, 2007.
- [11] B. Groothedde, C. Ruijgrok, and L. Tavasszy, "Towards collaborative, intermodal hub networks: A case study in the fast moving consumer goods market," *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 41, no. 6, pp. 567-583, 2005.
- [12] J. Hickman, D. Hassel, R. Joumard *et al.*, "Methodology for calculating transport emissions and energy consumption," *TRL, Crowthorne*, 1999.
- [13] J. M. Jancovici, *Bilan Carbone® : Calcul des facteurs d'émissions et sources bibliographiques utilisées*, ADEME, 2007.
- [14] M. W. Jorgensen, and S. C. Sorenson, "Estimating emissions from railway traffic," *International Journal of Vehicle Design*, vol. 20, no. 1, pp. 210-218, 1998.
- [15] R. Joumard, "Methods of estimation of atmospheric emissions from transport: European scientist network and scientific state-of-the-art," *INRETS report LTE*, vol. 9901, 1999.
- [16] S. Kameshwaran, and Y. Narahari, "Nonconvex piecewise linear knapsack problems," *European Journal of Operational Research*, vol. 192, no. 1, pp. 56-68, 2007.
- [17] J. Léonardi, and M. Baumgartner, "CO₂ efficiency in road freight transportation: Status quo, measures and potential," *Transportation Research Part D*, vol. 9, no. 6, pp. 451-464, 2004.
- [18] F. A. S. Marins, E. L. F. Senne, K. Darby-Dowman *et al.*, "Algorithms for network piecewise-linear programs: A comparative study," *European Journal of Operational Research*, vol. 97, no. 1, pp. 183-199, 1997.
- [19] A. McKinnon, Y. Ge, and D. Leuchars, "Analysis of Transport Efficiency in the UK Food Supply Chain," *Logistics Research Centre Heriot-Watt University, Edinburgh*, 2003.
- [20] C. Rizet, and B. KeïTa, "Chaînes logistiques et consommation d'énergie: cas du yaourt et du jean," *ADEME Project Report, Contrat INRETS/ADEME*, 2005.
- [21] J. C. Tyan, F.-K. Wang, and T. C. Du, "An evaluation of freight consolidation policies in global third party logistics," *Omega*, vol. 31, no. 1, pp. 55-62, 2003.