

## ENJEUX ENVIRONNEMENTAL ET ECONOMIQUE DE LA MUTUALISATION LOGISTIQUE POUR LES PME : LE CAS DE L'ALIMENTAIRE DANS L'OUEST DE LA FRANCE

Shenle PAN\*, Eric BALLOT\*\* et Frédéric FONTANE\*\*\*

---

Résumé. - La mutualisation des flux est une stratégie émergente d'amélioration de la performance logistique. Le principe de la mutualisation, tel que présenté ici, consiste à transférer l'effort de coordination pour massifier les flux d'opérateurs indépendants vers une organisation ad hoc mutualisée. Cette organisation est conçue pour partager des moyens de transport et des plateformes logistiques utilisés pour servir les mêmes clients. Dans cette contribution, ce principe est appliqué à un ensemble de petites et moyennes entreprises de l'Ouest de la France dans le domaine de l'alimentaire qui servent un même client distributeur. Pour démontrer la performance de la mutualisation, la situation actuelle a été comparée à différents scénarios de mutualisation. La méthode retenue a consisté à évaluer l'existant par une enquête sur une plateforme logistique servie par les entreprises pour valider la base de données puis à comparer l'existant à quatre scénarios type de mutualisation. Ces scénarios ont été évalués par leur coût et leur émission de CO<sub>2</sub>. Les résultats obtenus montrent que la mutualisation entraîne dans tous les cas une réduction des émissions de CO<sub>2</sub> significative et des variations de coût. Une perspective de généralisation des résultats est finalement proposée. Elle montre l'intérêt de la mutualisation pour la réduction des émissions tout en offrant des opérations performantes.

Mots-clés : Mutualisation ; Grande Distribution ; Emissions CO<sub>2</sub> ; Coût ; Optimisation.

---

\* Docteur du CGS, Mines ParisTech. Shenle.pan@mines-paristech.fr.

\*\* Professeur au CGS, Mines ParisTech. Eric.ballot@mines-paristech.fr.

\*\*\* Maître de Conférence au CAOR, Mines ParisTech. Frederic.fontane@mines-paristech.fr.

## 1. Introduction

Confrontées au problème de la standardisation de l'offre dans les magasins, les grandes enseignes ont intensifié depuis les années 2000 leurs relations avec les PME (Petites et Moyennes Entreprises). De fait, certains petits fournisseurs locaux peuvent maintenant proposer des produits de qualité. Avoir ces produits régionaux en rayon peut alors représenter un avantage concurrentiel et apporter une image de qualité et d'authenticité liée aux produits du terroir.

Par ailleurs, pour renforcer leur suprématie dans les linéaires, les grandes marques ont eu massivement recours au fameux système des accords de gamme. La méthode, dénoncée par les enseignes depuis des années, a permis aux groupes disposant de marques fortes d'imposer l'ensemble de leur gamme en échange de remises substantielles sur leurs produits leaders, la plupart du temps incontournables et dont le prix est souvent connu de tous les consommateurs. C'est aussi une des raisons qui a poussé les grandes enseignes à diversifier leur source d'approvisionnement et à intégrer des PME dans leur logique de référencement.

Bien qu'elles soient importantes pour les enseignes dans la logique de diversification et de marque propre de leur assortiment, les PME qui fournissent la grande distribution n'échappent pas aux exigences, notamment logistiques, des grandes enseignes. Ainsi, la grande distribution cherche à obtenir de ses fournisseurs des fréquences de livraison élevées sur ses plateformes afin de diminuer ses niveaux de ses stocks. Cependant, cette accélération des flux conduit aujourd'hui à une fragmentation des envois et à une difficulté de saturation des moyens de transport, ce qui est d'autant plus vrai pour les PME !

L'importance des PME dans la grande distribution, notamment au niveau alimentaire, est de fait de plus en plus marquée, comme le montre le Tableau 1 qui reprend les statistiques de la FCD. Bien que le nombre de PME fournisseurs de la grande distribution diminue sur la période 2003-2008, leur contribution aux activités des points de vente augmente sur la même période : le nombre de références +2%, le Chiffre d'Affaires +3% et la présence en linéaire +3,5%. Cela s'explique en partie par la croissance des Marques de Distributeur (MDD).

Année	2003	2010
<b>Nombre de fournisseurs</b>	4705	4071 (chiffre 2008)
<b>Part des fournisseurs</b>	62%	64%
<b>Part des références</b>	20%	22%
<b>Part du Chiffre d'Affaires</b>	16%	19%
<b>Part des linéaires</b>	13%	16.5%

Tableau 1 : PME françaises dans la grande distribution alimentaire nationale.

Plusieurs enquêtes montrent ainsi des camions peu saturés en surface et des trajets à vide non négligeables. En particulier au niveau de la chaîne logistique alimentaire une étude de

l'utilisation d'une flotte de 1000 camions a montré un coefficient d'occupation de 70% de la surface (McKinnon et al., 2003). Ce chiffre est confirmé par une simulation de la saturation des camions à partir d'une base de données de livraison de la grande distribution (Ballot and Fontane, 2010). En dépit des méthodes de consolidation développées (Bookbinder and Higginson, 2002, Campbell, 1990, Crainic and Rousseau, 1986, Daganzo, 1988, Dror and Hartman, 2007, Eynan and Fouque, 2003, Hall, 1987, Melachrinoudis et al., 2005, Pooley and Stenger, 1992, Tyan et al., 2003) par exemple, de l'établissement du lien entre l'efficacité du transport et le développement durable (McKinnon and Woodburn, 1994) et des efforts de consolidation menés par les prestataires logistiques et les transporteurs, il reste donc une marge significative de progrès. Cette marge devient aujourd'hui un enjeu important, non seulement, pour participer à la réduction des coûts logistiques mais surtout pour participer à la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> dont le transport est le premier poste en France (Boissieu, 2006).

C'est pourquoi nous avons réalisé ce travail en montrant que la conception de schémas logistiques mutualisés peut être une solution pour remédier à ces problèmes en nous basant sur une étude réelle réalisée en partenariat avec la FEEF<sup>1</sup> et Carrefour. Cette étude de cas nous permettra de montrer les enjeux environnementaux et économiques associés à la mutualisation du transport sur un ensemble de PME de l'ouest de la France dans le domaine de l'alimentaire qui servent un même client distributeur. A cette fin, la situation actuelle a été comparée à différents scénarios de mutualisation définis de façon collégiale avec les partenaires de cette étude. La méthode retenue a consisté à évaluer l'existant par une enquête sur une plateforme logistique servie par les entreprises étudiées pour valider la base de données puis à comparer cet existant à quatre scénarios types de mutualisation. Ces scénarios ont été optimisés selon le critère d'émissions de CO<sub>2</sub> puis évalués par les coûts logistiques. Les résultats obtenus montrent que la mutualisation conduit dans tous les cas à une réduction significative des émissions de CO<sub>2</sub> et à des variations de coût (impacts positifs ou négatifs en fonction de la stratégie de mutualisation retenue).

Dans la partie suivante, le cas du transport depuis de petites et moyennes entreprises de l'Ouest de la France vers des plateformes de la grande distribution a été étudié et sa performance évaluée.

## **2. Performance logistique des PME fournisseurs de la grande distribution**

### ***2.1 Périmètre de l'étude: PME de l'industrie alimentaire de l'Ouest de la France***

Obtenir des données homogènes de flux sur un échantillon de petites et moyennes entreprises est une tâche très difficile et fastidieuse. C'est pourquoi, le plus important client de ces PME (Carrefour) a accompagné cette démarche. Cette implication a permis de collecter

---

<sup>1</sup> Fédération des Entreprises et Entrepreneurs de France : <http://www.feef.org/>

l'ensemble des données de livraison de ces fournisseurs sous un même format et en provenance d'une seule base de données.

La définition de l'échantillon des données requiert à la fois de fixer un périmètre géographique et un horizon temporel.

En ce qui concerne le périmètre géographique le choix s'est porté sur la région Ouest de la France où la fédération possède une bonne représentation et le distributeur a cinq plateformes logistiques. Les extractions de la base de données ont permis d'identifier 231 fournisseurs de produits d'épicerie et de boissons sur le périmètre géographique retenu. Parmi ceux-ci un premier filtre a été opéré pour retirer les fournisseurs anecdotiques ou obsolètes (1 seul envoi en sur une année par exemple). Dans un deuxième temps, les fournisseurs dont les volumes sont très importants ont également été retirés (livraison de camions complets toutes les semaines). Cette recherche se concentrera donc sur des flux d'une même catégorie de produit (l'épicerie) et avec des flux semblables pour être mutualisés, tel que déjà démontré (Ballot and Fontane, 2010). Nous avons donc retenu 154 fournisseurs et la Figure 1 montre leur répartition sur la région.

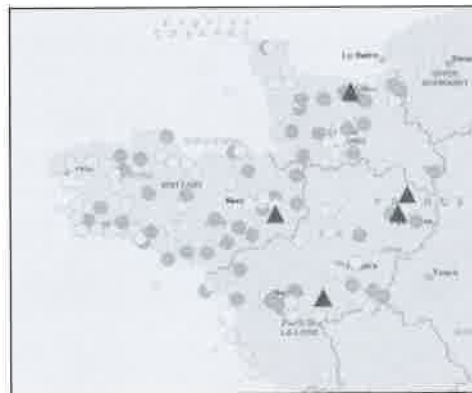


Figure 1 : Localisation des fournisseurs (cercle) et des plateformes du distributeur (triangle).

En termes d'horizon temporel, nous avons pu construire une base de données qui recense les livraisons effectuées entre les 154 fournisseurs (usine ou entrepôt) retenus et les 5 plateformes du grand distributeur sur un horizon de 33 semaines.

Cependant, ces données de flux ne permettent pas d'évaluer la performance logistique actuelle car elles n'offrent pas une mesure de la performance du transport notamment en termes de remplissage des camions. C'est pourquoi dans un premier temps, nous avons mené une enquête pour mesurer la performance du transport en arrivée sur les plateformes du distributeur.

## 2.2 *Evaluation de la solution actuelle et de la saturation des moyens de transport*

Pour juger de l'opportunité de mettre en œuvre des principes de mutualisation, nous avons pris l'existant comme référence. A cette fin, nous avons choisi d'examiner les livraisons sur une plateforme de distribution (la plateforme logistique de Carrefour située au Mans a été retenue) sur une période de temps limitée (une semaine). En effet, cette démarche permet de constater la charge réelle des camions en arrivée sur la plateforme servie. De plus, nous avons complété cet examen empirique par un questionnaire auprès des chauffeurs afin de mieux comprendre l'organisation du transport en amont.

En premier lieu, nous avons cherché à savoir si la plateforme située au Mans et sur laquelle il y a le plus de livraison, ce qui réduit la durée de l'enquête, était similaire en terme de taille de ses livraisons à celles des quatre autres plateformes du distributeur dans le périmètre géographique retenu. A cette fin nous avons construit un test de la différence entre les moyennes des tailles de livraisons de la plateforme de l'enquête et les moyennes des autres plateformes sur la base des 33 semaines. La valeur de  $p$  calculée (test unilatéral et hypothèse de variances égales)  $p=0.23$  permet de valider l'hypothèse de livraisons moyennes identiques entre l'entrepôt du Mans et les autres plateformes du périmètre géographique identifié.

Sur le site du Mans nous avons pu disposer d'une semaine d'enquête. Celle-ci a permis de recenser et d'observer 54 livraisons de 39 fournisseurs par 32 camions de capacité de 33 palettes (semi-remorque). On constate donc que des regroupements de livraisons dans un même camion existent déjà.

Pour vérifier la représentativité des données de livraisons de la semaine de l'enquête par rapport aux 33 autres semaines de la base de données, un nouveau test de différence entre les moyennes des tailles de livraisons a été réalisé. La valeur de  $p$  calculée (test unilatéral et hypothèse de variances égales)  $p=0.40$  permet de valider l'hypothèse de livraisons moyennes identiques entre la période observée et les données de la base sur l'ensemble de l'horizon temporel. L'enquête a montré un taux de chargement de 84% en surface sol (nombre de palettes / capacité en palettes) et de 67% en volume (volume palettes / volume total) sur l'échantillon des 32 camions. Ce résultat, supérieur aux enquêtes disponibles, indique une organisation logistique performante pour les 39 fournisseurs de l'échantillon.

Ces données permettent de faire l'hypothèse d'une répartition des chargements donnant les mêmes performances en livraison. Ceci conduit à postuler que les flux de plus de 27 palettes par livraison sont divisés en deux composants, un ou plusieurs lots en 27 palettes livrés par une livraison en trace directe, et puis le reste qui sera avec les autres flux de moins de 27 palettes faisant l'objet de tournées en amont. Il s'agit d'une hypothèse conservatrice car donnant une performance élevée pour la performance de la logistique actuelle.

Nous devons par la suite évaluer quantitativement les émissions de CO<sub>2</sub> et les coûts logistiques. Logiquement, nous supposons que la solution actuelle de type tournée de livraison avant mutualisation est déjà optimisée par les transporteurs. Mais par contre nous n'avons pas la possibilité de connaître les trajets exacts des tournées réalisées. C'est pourquoi, la méthode NVRM (Nondetailed Vehicle Routing Models) proposée par Daganzo est adaptée pour estimer les trajets des tournées, voir (Daganzo, 2005) et (Langevin et al., 1996). Les résultats sont présentés dans la partie 6.

Avant d'examiner les différents scénarios de mutualisation retenus dans cette étude, nous allons définir ce que recouvre la notion de mutualisation dans cet article.

### **3. Mutualisation de la chaîne logistique**

#### ***3.1 Principe et définition***

Regrouper les flux pour les massifier est une idée relativement ancienne et très connue dans le domaine du transport. Ainsi Hall (Hall, 1987) puis Pooley et Stenger (Pooley and Stenger, 1992) ont défini plusieurs formes de consolidation : entrepôt de consolidation, plateforme de cross-docking de consolidation, consolidation au niveau du moyen de transport. Ces consolidations s'entendent essentiellement au niveau des opérateurs de transport : transporteur, messagerie, intégrateur. Cependant au niveau des réseaux de distribution leur conception est définie par chaque entreprise (fournisseur, distributeur, etc.) indépendamment des autres.

La mutualisation, telle que définie ici, concerne la mise en commun, voire la conception en commun, de chaînes logistiques. Il s'agit du partage entre acteurs économiques indépendants d'un réseau logistique indépendamment de son exploitation (par un prestataire ou plusieurs prestataires) ou de sa structure (de la tournée d'un camion à un réseau de distribution). La mutualisation est donc une forme de collaboration horizontale tel que proposé par (Cruijssen et al., 2007). C'est également une collaboration stratégique.

On en déduit que la conception d'un réseau logistique mutualisé (localisation des plateformes) est semblable à celle d'un réseau traditionnel dans son principe mais avec des gains potentiels à évaluer. De plus la mutualisation conduit à un changement des localisations, des flux et de l'organisation, voire à des changements modaux. Pour plus de détails il suffit de se référer aux travaux menés sur la mutualisation de deux enseignes et de leurs principaux fournisseurs (Pan et al., 2010).

### **3.2 Critères d'évaluation**

La mutualisation sera évaluée par deux critères : l'un environnemental et l'autre économique, tout en précisant que l'ensemble des solutions retenues conserve le niveau de service initial à la maille de la semaine, voire l'améliore.

Dans cette étude, l'optimisation a porté en premier lieu sur les émissions de CO<sub>2</sub>, puis le coût de la solution a été évalué.

#### **3.2.1 Critère environnemental**

L'aspect environnemental sera mesuré par les émissions de CO<sub>2</sub>. Le périmètre de calcul se limitera aux activités de transport car, d'une part, il s'agit de la part prépondérante et, d'autre part, il n'existe pas, à la connaissance des auteurs, de base de données fiable sur les émissions des entrepôts et des opérations de manutention.

Au niveau des émissions de CO<sub>2</sub>, celles-ci sont reprises des travaux Européens COST 319 (Joumard, 1999) et leur formulation pour l'évaluation de réseau logistique a été développée dans (Pan et al., 2010). On pourra s'y référer pour les principes de calcul et les valeurs retenues.

#### **3.2.2 Critère économique**

Sur le plan économique les coûts seront évalués par quatre composantes : le coût de transport, le coût de passage par un entrepôt ou le coût de transfert par une plateforme, et le coût de stockage. Ces coûts sont basés sur des grilles tarifaires réelles sur la région concernée qui sont fournies par les partenaires de cette étude.

Dans la partie suivante, nous allons présenter la mutualisation dans les différents scénarios et la modélisation.

## **4. Mutualisation des flux de petites et moyennes entreprises vers la grande distribution**

Pour étudier l'opportunité de la mutualisation comme définie avant, nous proposons quatre scénarios d'organisation logistique mutualisée afin de les comparer en termes de performance à l'organisation logistique actuelle. Il ne s'agit pas ici de définir une solution mais d'identifier les enjeux de la mutualisation dont les résultats seront présentés au paragraphe 6.

#### 4.1 Scénario 1 : Mutualisation d'entrepôts livrés en camions complets et directs

##### 4.1.1 Définition

Par rapport au cas actuel, le premier scénario propose un réseau logistique avec des centres de mutualisation et des livraisons directes en camions complets en amont et en aval (Figure 2).



Figure 2 : Réseau logistique avec centres de mutualisation et livraison directe en camions complets dans l'amont et l'aval.

Nous supposons que tous les fournisseurs expédient en camions complets leurs marchandises à un centre de mutualisation commun (appelés « hub ») et que les plateformes du distributeur sont également approvisionnées en camions complets.

##### 4.1.2 Formulation

Ce scénario s'apparente à un problème de transport multi périodes (33) avec plusieurs commodités et à deux échelons. L'hypothèse du camion complet peut être traduite par la linéarité des émissions de transport. Cela conduit à une fonction objectif purement linéaire. Cependant, en raison des contraintes de sélection de hub, le problème d'optimisation correspond à une Programmation Linéaire en Nombres Entiers (PLNE).

$$\text{Min} \sum_{t \in T} ( \sum_{om \in A_o} [d_{om} \cdot \varepsilon(x_{omt}^s)] + \sum_{md \in A_d} [d_{md} \cdot \varepsilon(x_{mdt}^s)] ) \quad (1)$$

Contraintes d'équilibre des flux :

$$x_{at}^s = \sum_{k \in K} x_{at}^k ; \quad \forall a \in A, \forall s \in S_a, \forall t \in T \quad (2)$$

$$x_{at}^k \geq 0 ; \quad \forall a \in A, \forall k \in K, \forall t \in T \quad (3)$$

$$\sum_{m \in M} x_{omt}^k = R_{ot}^k ; \quad \forall k \in K, \forall o \in O, \forall t \in T \quad (4)$$

$$\sum_{m \in M} x_{mdt}^k = B_{dt}^k ; \quad \forall k \in K, \forall d \in D, \forall t \in T \quad (5)$$



$$\sum_{o \in O} x_{omt}^k = \sum_{d \in D} x_{mdt}^k; \forall k \in K, \forall m \in M, \forall t \in T \quad (6)$$

Contraintes de sélection des hubs :

$$\sum_{m \in M} p_{omt}^k = 1; \quad \forall k \in K, \quad \forall o \in O, \quad \forall t \in T \quad (7)$$

$$p_{omt}^k \in \{0,1\}; \forall k \in K, \forall o \in O, \forall m \in M, \forall t \in T \quad (8)$$

$$x_{omt}^k \leq p_{omt}^k \cdot Z; \forall k \in K, \forall o \in O, \forall m \in M, \forall t \in T \quad (9)$$

$$p_{omt}^k = p_{omt'}^k; \forall k \in K, \forall o \in O, \forall m \in M, \forall t \in T \quad (10)$$

Où :

Z : une constante grande;

T : l'horizon de temps (unité de temps en semaine);

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

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

$A_u, A_d$  : sous-ensembles de l'ensemble des arcs  $A$  avec  $A_u$  l'ensemble des arcs amonts et  $A_d$  aval;

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

$d_{ij}$  : distance d'un arc  $ij \in A$ ;

$\mathcal{E}(x)$  : fonction des émissions de CO<sub>2</sub> liée au flux  $x$ ;

$R_{ot}^k$  : quantité de produit  $k \in K$  fourni au nœud de source  $o \in O$  à la semaine  $t \in T$ ;

$B_{dt}^k$  : quantité de produit  $k \in K$  demandé au centre de distribution  $d \in D$  à la semaine  $t \in T$ ;

$x_{at}^s$  : somme de flux sur l'arc  $a \in A$  à la semaine  $t \in T$  et  $x_{at}^s = \sum_{k \in K} x_{at}^k$ ;

Variables de décision:

$x_{at}^k$  : quantité de flux de produit  $k \in K$  sur l'arc  $a \in A$  à la semaine  $t \in T$ ;

$p_{omt}^k$  : variable binaire avec  $p_{omt}^k = 1$  si le flux de produit  $k \in K$  qui part de WH  $o \in O$  arrive au centre de mutualisation  $m \in M$  à la semaine  $t \in T$ ; sinon 0;

Les contraintes (2) à (6) sont classiques et permettent de conserver les flux dans le réseau en satisfaisant les demandes. Les contraintes (7) à (9) assurent que les flux en amont sont tous massifiés dans les centres de mutualisation. Enfin, la contrainte (10) assure que chaque fournisseur ne livre qu'un centre et toujours le même dans l'horizon des 33 semaines.

#### 4.1.3 Etude de la sensibilité des émissions de CO<sub>2</sub> en fonction du nombre de centres de mutualisation

Il est assez évident que plus il y aura de centres de mutualisation ouverts plus les émissions de CO<sub>2</sub> dues au transport tendront à diminuer. Cependant, des coûts supplémentaires seront introduits par chaque implantation de centre. En conséquence, l'objectif de cette étude de sensibilité est de déterminer le nombre de centres de mutualisation qui offre un bon compromis entre le niveau des émissions de CO<sub>2</sub> et le coût induit par l'ouverture de ces hubs. Pour ce faire, nous imposons les contraintes suivantes :

$$OPEN_{mt} \in \{0,1\} ; \quad \forall m \in M \quad (11)$$

$$\sum_{m \in M} OPEN_{mt} = N ; \quad \forall t \in T \quad (12)$$

$$x_{omt}^k \leq OPEN_{mt} \cdot Z ; \quad \forall k \in K, \forall o \in O, \forall m \in M, \forall t \in T \quad (13)$$

Le variable de décision  $OPEN_{mt}$  vaut 1 si le centre  $m$  est ouvert et vaut 0 sinon;  $N$  dans la contrainte (12) est un entier. Avec ces contraintes, nous pouvons faire varier la valeur de  $N$  pour obtenir des résultats d'optimisation différents.

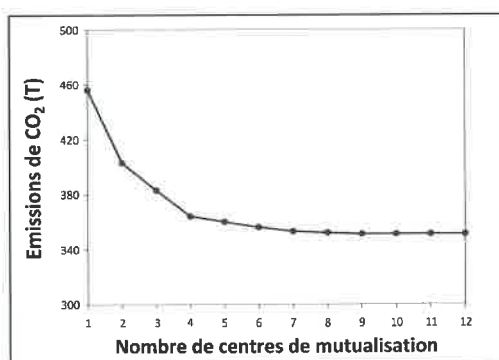


Figure 2 : Emissions de CO<sub>2</sub> par rapport au nombre de centres de mutualisation.

Dans un premier temps, d'après la répartition des fournisseurs de la Figure 1, 12 centres de mutualisation sont proposés comme candidats, donc  $N=1,..,12$ . La figure 2 montre les résultats de l'optimisation des émissions de CO<sub>2</sub> lorsque  $N$  varie.

Selon cette courbe, retenir quatre centres de mutualisation semble offrir un bon compromis pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub>.

## 4.2 Scénario 2 : Mutualisation par des plateformes de Cross-docking

### 4.2.1 Définition

Comme montré dans la Figure 4, ce scénario mobilise un réseau logistique où les centres de mutualisation sont opérés en cross docking. Cela signifie que le transport réalisé en amont et en aval n'est plus systématiquement en camion complet. Le principe est donc de regrouper et de massifier les flux en amont afin de saturer les moyens de transport en aval mais sans consentir de stock intermédiaire.



Figure 4 : Cross-docking aux centres de mutualisation.

### 4.2.2 Formulation

Nous reprenons le modèle du scénario 1 sachant que le transport en camion complet n'est plus assuré dans ce cas. La fonction objectif (1) n'est plus purement linéaire mais linéaire par morceaux en raison du nombre de moyens de transport nécessaires pour chaque livraison. En conséquence, il faut modifier la forme de la fonction objectif (1) en imposant les contraintes suivantes sur la fonction des émissions du transport, se référant à (Pan et al., 2010) :

$$g(x_{at}) = f_a^s y_a^s + v_a^s z_{at}^s \quad (14)$$

Contraintes de linéaire par morceaux:

$$x_{at} = \sum_{s \in S_a} z_{at}^s ; \forall a \in A, \forall t \in T \quad (15)$$

$$x_{at} = \sum_{k \in K} x_{at}^k, \forall a \in A, \forall t \in T \quad (16)$$

$$lb_a^s y_a^s \leq z_{at}^s \leq ub_a^s y_a^s, \forall a \in A, \forall s \in S_a, \forall t \in T \quad (17)$$

$$\sum_{s \in S_a} y_a^s \leq 1, \forall a \in A \quad (18)$$

$$y_a^s \in \{0,1\}, \forall a \in A, \forall s \in S_a \quad (19)$$

Où :

$S_a$  : représente le nombre de segments sur l'arc  $a \in A$  ;

$s$  : segment linéaire de la fonction  $s \in S_a$  sur l'arc  $a$  ;

$f_a^s$  : valeur fixée et non négative de l'intersection du segment  $s$  sur l'arc  $a$ ; avec  $f_a^s=0,772$  identique pour tous les segments, voir (Pan et al., 2010) ;

$v_a^s$  : pente du segment  $s$  sur l'arc  $a$ , qui est identique pour tous les arcs et tous les segments, avec  $v_a^s=0,00982$  identique pour tous les segments en transport routier, voir (Pan et al., 2010) ;

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

$lb_a^s$  et  $ub_a^s$  : borne inférieure et supérieure du flux total du segment  $s$  sur l'arc  $a$ . En particulier pour chaque arc  $a$  on suppose que  $lb_a^s=0$  et  $ub_a^s=+\infty$ ; et également que pour chaque segment  $s$ ,  $ub_a^s-lb_a^s=W_c$  qui représente la capacité du moyen de transport ;

$z_{at}^s$  : flux liés au segment  $s$  sur l'arc  $a$  à la semaine  $t$  ;

### 4.2.3 Résolution

Ce problème est de fait un autre exemple de PLNE NP-difficile. Pour résoudre ce problème, nous faisons l'hypothèse que tous les camions sont complets au-delà d'un volume représentant 2 camions par livraison. Nous avons montré (Pan et al., 2010) que cette hypothèse est très efficace pour réduire le temps de calcul. Dans notre cas elle a un impact marginal sur le résultat de l'optimisation, car cette étude ne concerne que des PME qui livrent de faibles volumes.

## 4.3 Scénario 3 : Mutualisation d'entrepôts livrés par tournées

### 4.3.1 Définition

Dans ce scénario, le transport en amont est réalisé par des tournées de collecte. Pour respecter les contraintes capacitaires des moyens de transport et simplifier le problème, les flux des fournisseurs supérieurs à 33 palettes par livraison sont séparés en deux parties, l'une est traitée comme une livraison directe en camion complet ; et l'autre partie est un volume résiduel

candidat à une tournée de « ramasse ». Bertazzi et al. (1997) détaille cette stratégie. Les flux sont livrés en camion complet depuis les entrepôts mutualisés aux plateformes du grand distributeur comme le montre la Figure 5.



Figure 5 : entrepôt mutualisé servi par livraisons directes et tournées.

Le choix des centres de mutualisation est stable dans tous les deux scénarios précédents, cette localisation sera reprise ici. Il faut préciser qu'à la fin de chaque tournée en amont les véhicules ne sont pas forcément à pleine charge mais la saturation des moyens de transport n'est pas l'objectif de l'optimisation.

#### 4.3.2 Formulation

Comme la même hypothèse de camion complet en aval est faite, les scénarios 1 et 3 ont des résultats similaires sur cette partie du flux. Par contre, il faut modéliser d'une manière différente le problème d'optimisation en amont. Il est nécessaire de respecter la capacité des véhicules. De ce fait, ce cas est un problème de type Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP) qui est un autre problème NP-difficile. Pour le traiter, nous adoptons le modèle classique de minimisation de la distance parcourue. A ce niveau, l'impact du chargement sur chaque segment de tournées n'est pas pris en compte dans la minimisation des émissions. Le sens préférable pour les émissions est ensuite adopté. La stratégie est donc : route en premier et charge en second.

$$\text{Min} \sum_{i \neq j} d_{ij} x_{ij} \quad (20)$$

$$\sum_{j=2}^n x_{1j} = m \quad ; \quad (21)$$

$$\sum_{i=2}^n x_{i1} = m \quad ; \quad (22)$$

$$\sum_{j=1, j \neq i}^n x_{ij} = 1 \quad (i=2, \dots, n); \quad (23)$$

$$\sum_{i=1, j \neq i}^n x_{ij} = 1 \quad (j=2, \dots, n); \quad (24)$$

$$q_i \leq u_i \leq Q \quad (i=2, \dots, n); \quad (25)$$

$$u_i \leq Q + (q_i - Q)x_{1i} \quad (i=2, \dots, n); \quad (26)$$

$$u_i - u_j + Qx_{ij} + (Q - q_i - q_j)x_{ji} \leq Q - q_j \quad (i, j=2, \dots, n; i \neq j); \quad (27)$$

$$u_i \geq 0 \quad (i=2, \dots, n); \quad (28)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad (i, j=1, \dots, n; i \neq j); \quad (29)$$

### 4.3.3 Résolution

Le modèle ci-dessus (Kara et al., 2004, Guéret et al., 2002) se fonde sur la variable binaire  $X_{ij}$  qui vaut 1 si le site  $i$  est suivi immédiatement par le site  $j$  dans une tournée et 0 sinon. Sur l'ensemble des sites  $\{1, \dots, N\}$ , le site 1 représente le point de départ qui est un centre de mutualisation dans ce cas puis les sites  $\{2, \dots, N\}$  sont des points fournisseurs à visiter. Afin de respecter la capacité du véhicule  $Q$ , nous utilisons le variable  $u_i$  correspondant à la quantité de produits ramassés aux différents entrepôts lors du trajet allant du site 1 au site  $i$  inclus. La valeur de  $u_i$  doit toujours être inférieure ou égale à la capacité  $Q$  mais supérieure ou égale à la charge à ramasser au site  $i$  notée  $q_i$ .

En général, le temps de calcul pour un problème de type CVRP croît de façon exponentielle avec le nombre de points de ramassage (Toth and Vigo, 2002). Afin de réduire la complexité du problème, nous décomposons le réseau logistique par la zone première-route seconde. C'est-à-dire que les entrepôts des fournisseurs sont associés à un et un seul centre de mutualisation considéré comme le plus proche. Les flux en amont sont maintenant traités par centre. Cependant, il y a en moyenne plus de 20 points potentiels de ramassage par centre et par semaine, cela nous conduit à imposer une contrainte de plus (30).

$$d_{ij}x_{ij} \leq D \quad (i, j=2, \dots, n; i \neq j); \quad (30)$$

Cette contrainte a pour but de limiter la distance entre deux points de ramassage. Cette contrainte réduit considérablement le temps de calcul. En effet, dans notre étude, nous avons ainsi obtenu une solution avec moins de 3% d'écart en 30 minutes environ. Par contre, le temps

de calcul et la qualité de l'optimisation sont sensibles à la valeur choisie pour D. Une étude de sensibilité complémentaire a montré que D=50km est le meilleur compromis.

Il est évident que le modèle ainsi développé pour ce scénario ne minimise pas directement les émissions de CO<sub>2</sub> ou le coût du transport, mais la distance parcourue. C'est une limite de ce scénario. Néanmoins, l'optimisation des distances parcourues est également une optimisation des émissions et du coût de transport en raison de leur forte corrélation. De plus, afin d'être comparable avec les autres scénarios (aller simple), les premiers trajets à vide sont ôtés de la comptabilisation en émission et/ou en coût.

#### 4.4 Scénario 4 : Mutualisation par des tournées de camions

Le scénario 4 consiste à mutualiser des moyens de transport sans avoir un centre de mutualisation intermédiaire. Toutes les livraisons se font directement depuis les fournisseurs vers les plateformes du distributeur comme le montre la Figure 6. La stratégie de ramasse par tournées est identique à celle du troisième scénario. En conséquence le modèle du scénario précédent est aussi adopté dans ce cas, ainsi que la contrainte (30).

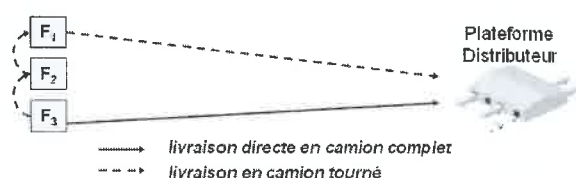


Figure 6 : Mutualisation de moyen de transport

## 5. Evaluation des stocks

La méthode d'évaluation des stocks est reprise de (Blumenfeld et al., 1985). Cette méthode présente l'avantage d'estimer le temps passé (donc le stock) à chaque point de stockage à partir des données logistiques. Plusieurs hypothèses sont faites : la taille de lot de production est négligée ; le temps de transport est négligé ; même coût de stockage à tous les points de stockage ; bien que chaque fournisseur ait plusieurs références de produit, une seule valeur de produit globale (€/palette) par fournisseur est utilisée.

Le périmètre retenu débute après la production jusqu'à la réception sur les plateformes du distributeur. Par exemple pour le scénario 1, nous transposons la formule développée dans l'article référencé :

$$C = PR \left( \frac{V_1}{2Q_1} + T_c + \frac{V_2}{Q_2} \right) \quad (31)$$

Où :

$C$ : coût de stock pour une période par fournisseur et par palette;

$P$ : valeur moyenne des produits par fournisseur et par palette ;

$R$ : taux de possession par semaine;

$V_1$ : taille d'expédition sur un arc origine-centre de mutualisation;

$V_2$ : taille d'expédition sur un arc centre de mutualisation-plateforme;

$Q_1$ : flux de demande sur un arc origine-centre de mutualisation par semaine;

$Q_2$ : flux de demande sur un arc centre de mutualisation-plateforme par semaine;

$T_c$ : temps de transfert au centre de mutualisation;

Les composants entre parenthèse représentent les temps en stock par palette pendant un horizon de temps. En particulier, nous supposons que les fournisseurs livrent leurs marchandises immédiatement après la production, donc il n'y a que les stocks au centre de mutualisation dans ce cas-là.

Sachant que la formule (29) est seulement pour un flux d'un fournisseur, afin de calculer le coût de stock sur l'ensemble des fournisseurs dans un horizon de 33 semaines du Scénario 1, nous utilisons la formule dessous:

$$C = \sum_{k \in K} P^k R \left[ \left( \frac{V_1^k}{2Q_1^k} + T_c \right) \sum_{d \in D} B_d^k + \sum_{d \in D} \frac{V_2^k}{Q_2^k} B_d^k \right] \quad (32)$$

Où :

$K$  : ensemble des fournisseurs;

$D$  : ensemble des plateformes;

$B_d^k$ : somme de demande sur l'ensemble de 33 semaines du fournisseur  $k \in K$  à la plateforme  $d \in D$ ;

D'une manière générale, les formules (31) et (32) peuvent aussi être appliquées aux autres scénarios et à la situation actuelle, mais, les valeurs de  $V$ ,  $T_c$  et  $Q$  sont différentes dans chaque



cas. Par exemple, la taille des expéditions est fonction de chaque scénario et de chaque maillon de la chaîne logistique.

Le coût de stockage est intégré au coût total de chaque scénario ainsi qu'à la situation actuelle pour donner une évaluation économique des scénarios.

## 6. Résultats et discussion

### 6.1 Résolutions

Les modèles d'optimisation mathématique présentés dans le quatrième paragraphe ont été résolus numériquement avec CPLEX 12. Les résultats proviennent d'une machine Quad CPU Q6700 (2.66 GHz) et 4 GB de RAM. Concernant les problèmes PLNE des scénarios 1-3, les résultats sont obtenus directement par les calculs du logiciel. Par contre, quant au problème de tournées de véhicules avec contrainte de capacité (CVRP) des scénarios 3 et 4, l'optimisation est faite d'une manière générale semaine par semaine et cas par cas sur la distance parcourue. Les résultats sur l'ensemble de 33 semaines sont obtenus par un post-traitement.

### 6.2 Résultats et discussions

L'objectif de cette partie était de montrer l'ensemble des résultats obtenus, environnementaux et économiques pour chaque scénario lié à la mise en œuvre de démarches de mutualisation pour des entreprises PME de l'ouest de la France, voir le Tableau 2.

Scénarios	Optimisation Emissions de CO <sub>2</sub>	
	CO <sub>2</sub> * (T)	Coût (k€)
<b>S0</b>	646	1102
<b>Minimum</b>	330	-
<b>S1</b>	364	1210
<b>S2</b>	524	1015 à 1479
<b>S3</b>	426	1258
<b>S4</b>	537	1086

Tableau 2 : Résultats des 4 scénarios d'optimisation et des références.

La première remarque porte sur le scénario S2 au niveau économique, en effet il y a deux valeurs possibles dues aux opérations de cross-docking à réaliser au centre de passage à quai. En effet, comme on ne peut pas savoir a priori le nombre de palettes qui seront « éclatées » sur le centre en cross-docking, nous donnons les bornes inférieures et supérieures du coût qui correspondent respectivement à 0% et 100% d'éclatement en cross-docking

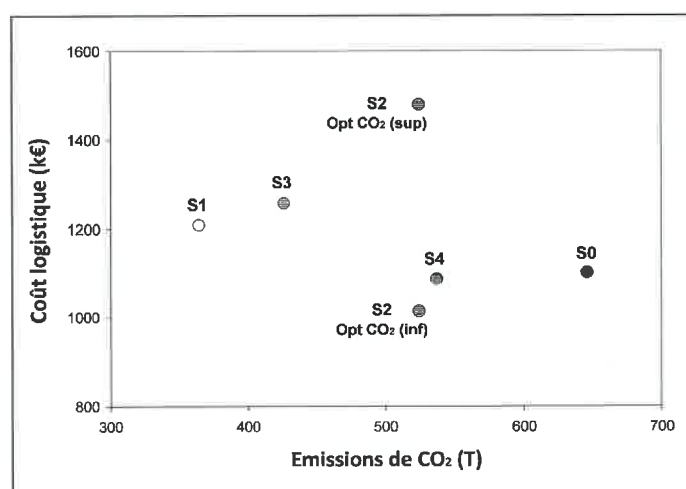


Figure 7 : Trade-off entre les émissions de CO<sub>2</sub> et les coûts logistiques.

Selon la Figure 7, nous pouvons constater que tous les scénarios étudiés ont une meilleure performance en termes d'émissions de CO<sub>2</sub> par rapport au cas actuel le S0. Malgré l'hypothèse prudente quant à l'estimation de la performance du cas actuel, nous pouvons observer que les différents scénarios de mutualisation atteignent une réduction des émissions de CO<sub>2</sub> comprise entre 16 % et 43 %. De plus, nous avons identifié le potentiel maximal de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> à savoir 49% des émissions de référence. En raison de l'hypothèse de livraisons directes (via centre intermédiaire) en camions complets, le scénario 1 produit des émissions très comparables à la valeur de référence minimum.

Du point de vue économique, les scénarios d'optimisation montrent une performance comparable en termes de coûts logistiques. Comme le montre la Figure 7, le scénario S4 est très proche de la référence, car tous les deux adoptent la même stratégie de multi-pick. Par ailleurs, le coût du scénario S1 n'est pas très supérieur à celui du cas actuel S0. Néanmoins, en raison du périmètre de cette étude, nous n'avons pas pu évaluer l'impact sur le stock de sécurité. Or, la rotation des produits doit être plus rapide après mutualisation, ce qui doit conduire à une diminution du niveau des stocks de sécurité.

### 6.2.1 Discussions

En termes d'émissions, la mutualisation propose donc une solution d'organisation pertinente sur la population des PME du périmètre étudié. Les différents scénarios démontrent une performance meilleure que la situation actuelle dite de référence. En particulier, les scénarios comprenant des camions complets présentent l'avantage de diminuer les émissions. Par exemple, avec une réduction de 43%, le scénario 1 tend vers la réduction maximale de 49%.

Le S3 est un peu moins performant, mais il conduit également à une réduction de 34% par rapport au cas actuel.

Cette étude montre également qu'il n'existe pas une solution de mutualisation qui dominerait les autres sur l'ensemble des critères. Au contraire, chacune des solutions étudiées a son domaine de validité en fonction des volumes et, notamment, de la densité géographique des flux. A ce titre cette étude ne prétend pas donner la meilleure solution sur la région du fait des limitations indiquées et du périmètre retenu. En fait, la solution pour ce cas pourrait être une solution hybride des scénarios en fonction des flux des fournisseurs.

Par exemple, le scénario 1, avec l'hypothèse de camions complets a la meilleure performance en termes de réduction des émissions de CO<sub>2</sub>, mais en générant des stocks supplémentaires, sauf lorsque des volumes importants doivent être expédiés. En conséquence, S1 pourrait être sélectionné pour les fournisseurs à plus fort volume dans le panel des fournisseurs.

Enfin, il est important de souligner que la mise en œuvre de ce genre de solution doit respecter les caractéristiques locales : la taille de fournisseur, la densité et la localisation géographique des points de rupture de charge et aussi l'importance (en surface) de la région.

## 7. Conclusion

Cette étude, qui repose sur le thème de la mutualisation des chaînes logistiques, vise à mesurer l'intérêt de ce type d'organisation pour répondre aux tensions actuelles de la logistique de la grande distribution. Comment réduire les émissions du transport et les coûts logistiques tout en maintenant, voire en améliorant, le taux de service ? Dans cette étude, nous avons exploré quatre modèles types de mutualisation pour des PME fournisseurs de la grande distribution afin d'éclairer les décideurs de ces entreprises pour répondre à ces nouvelles exigences. Via les modèles d'optimisation développés pour chaque scénario, nous les avons évalués quantitativement en termes d'émissions de CO<sub>2</sub> et du coût logistique.

Au niveau de l'environnement, les quatre scénarios étudiés ont montré une bien meilleure performance que la solution actuelle avec des réductions d'émissions de l'ordre de 13% à 43% sur un maximum atteignable à iso technologie de 49%. De plus, cette étude ne comprend qu'un seul distributeur pour la mutualisation, on peut donc envisager des gains supérieurs si cette organisation servait plusieurs enseignes. C'est une limite de la mutualisation mais aussi du travail, car il n'est pas impossible que la création de ces schémas vienne réduire l'efficacité des schémas antérieurs de chaque fournisseur vers l'ensemble de ses clients.

La mutualisation, ici encore, présente donc un intérêt environnemental indéniable, alors même que la performance initiale était élevée.

D'un point de vue économique, l'évaluation de l'impact économique a pris en compte les facteurs les plus importants (transport, transit et stockage). Les scénarios optimisés montrent des différences de coûts en fonction de l'organisation logistique, mais tous sont comparables avec la situation actuelle estimée. En chiffre, le scénario S4, dit multi-pick, présente la meilleure performance économique qui est quasiment identique au statu quo S0. Mais pour les S1 et S3 qui sont les plus performants en réduction des émissions, ils ont respectivement un surcoût de 10% et 14% par rapport à l'estimation du statu quo en raison du haut niveau de stocks dans les centres de mutualisation. De plus, il est difficile de comparer le S2 avec les autres scénarios, car il n'offre que les valeurs supérieures et inférieures d'optimisation. Mais selon la Figure 7, on pourra envisager que le coût réel du S2 doit être également comparable avec les autres. En outre, avant application, les autres coûts logistiques doivent être identifiés dans l'évaluation afin d'assurer la faisabilité du concept, notamment l'investissement, les systèmes d'informations, etc.

Enfin, le périmètre comprend une seule enseigne. Or il est difficilement envisageable qu'une organisation logistique puisse être dédiée de manière pérenne à une seule enseigne, cela va même à l'encontre du principe même de la mutualisation. Il apparaît donc qu'il existe dans l'extension des résultats à d'autres enseignes une voie d'amélioration de la performance, mais également de pérennisation de la démarche.

## 8. Remerciements

Nous remercions la fédération de PME qui nous a supportés pour cette recherche. Nous remercions également Carrefour, ADEME ainsi que Generix Group France pour leur participation ou leur support.

## 9. Bibliographie

- BALLOT, E. & FONTANE, F. (2010) Reducing transportation CO2 emissions through pooling of supply networks: perspectives from a case study in French retail chains. *Production Planning & Control: The Management of Operations*, 21, 640 - 650.
- BLUMENFELD, D. E., BURNS, L. D., DILTZ, J. D. & DAGANZO, C. F. (1985) Analyzing trade-offs between transportation, inventory and production costs on freight networks. *Transportation Research Part B: Methodological*, 19, 361-380.
- BOISSIEU, C. D. (2006) Division par quatre des émissions de gaz à effet de serre de la France à l'horizon 2050. Ministère des Finances de l'Economie et de l'Industrie.

- BOOKBINDER, J. H. & HIGGINSON, J. K. (2002) Probabilistic modeling of freight consolidation by private carriage. *Transportation research Part E*, 38, 305-318.
- CAMPBELL, J. F. (1990) Freight consolidation and routing with transportation economies of scale. *Transportation Research Part B*, 24, 345-361.
- CRAINIC, T. G. & ROUSSEAU, J.-M. (1986) Multicommodity, multimode freight transportation: a general modeling and algorithmic framework for the service network design problem. *Transportation Research Part B*, 20, 225-242.
- CRUIJSSSEN, F., COOLS, M. & DULLAERT, W. (2007) Horizontal cooperation in logistics: Opportunities and impediments. *Transportation Research Part E*, 2007, 129-142.
- DAGANZO, C. F. (1988) A Comparaison of in-vehicule out-of-vehicule freight consolidation strategies *Transportation Research Part B*, 22B, 173-180.
- DAGANZO, C. F. (2005) *Logistics systems analysis*, Berlin, Springer.
- DROR, M. & HARTMAN, B. C. (2007) Shipment Consolidation: Who Pays for It and How Much? *Management Science*, 53, 78-87.
- EYNAN, A. & FOUQUE, T. (2003) Capturing the Risk-Pooling Effect Through Demand Reshape. *Management Science*, 49, 704-717.
- GUÉRET, C., PRINS, C. & SEVAUX, M. (2002) *Applications of optimization with Xpress-MP*, Paris, Dash Optimization Ltd.
- HALL, R. W. (1987) Consolidation strategy: inventory, vehicles and terminals. *Journal of Business Logistics*, 8, 57.
- JOUMARD, R. (1999) *Methods of estimation of atmospheric emissions from transport: European scientist network and scientific state-of-the art COST 319 final report*. Bron, INRETS.
- KARA, I., LAPORTE, G. & BEKTAS, T. (2004) A note on the lifted Miller-Tucker-Zemlin subtour elimination constraints for the capacitated vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*, 158, 793-795.
- LANGEVIN, A., MBARAGA, P. & CAMPBELL, J. F. (1996) Continuous approximation models in freight distribution: An overview. *Transportation Research Part B: Methodological*, 30, 163-188.
- MCKINNON, A., GE, Y. & LEUCHARS, D. (2003) *Analysis of Transport Efficiency in the UK Food Supply Chain*. IN CENTRE, L. R. & LANGUAGES, S. O. M. A. (Eds.). Edinburgh.
- MCKINNON, A. C. & WOODBURN, A. (1994) The consolidation of retail deliveries: its effect on CO2 emissions. *Transport Policy*, 1, 125-136.
- MELACHRINOUDIS, E., MESSAC, A. & MIN, H. (2005) Consolidating a warehouse network:: A physical programming approach. *International Journal of Production Economics*, 97, 1-17.
- PAN, S., BALLOT, E. & FONTANE, F. (2010) The reduction of greenhouse gas emissions from freight transport by pooling supply chains. *International Journal of Production Economics*, In Press, Accepted Manuscript (doi:10.1016/j.ijpe.2010.04.041).
- POOLEY, J. & STENGER, A. J. (1992) Modeling and evaluating shipment consolidation in a logistics system. *Journal of Business Logistics*, 13, 153-174.

- TOTH, P. & VIGO, D. (2002) Models, relaxations and exact approaches for the capacitated vehicle routing problem. *Discrete Applied Mathematics*, 123, 487-512.
- TYAN, J. C., WANG, F.-K. & DU, T. C. (2003) An evaluation of freight consolidation policies in global third party logistics. *Omega-International Journal of Management Science*, 31, 55-62.