

## Projet Carbone-Fret

# **Efficacité de politiques de rationnement carbone sur les organisations logistiques de distribution des chargeurs et les émissions de GES du transport de marchandises**

RAPPORT FINAL

4 février - 2010

Projet financé par l'ADEME – Marché n°07 66 C0121

Predit 3 – GO11 – Politiques des transports

**Complexio**

Outils d'aide à la décision & modèles de simulation

**LET**  
Laboratoire  
d'Economie  
des Transports





**ORGANISMES PARTENAIRES :**

**SARL Complexio**

**Valérie GACOGNE**

10 Bis Avenue des Gobelins

F-75005 Paris

Tél : 01 45 87 04 51

[www.complexio.eu](http://www.complexio.eu)

[valerie.gacogne@complexio.eu](mailto:valerie.gacogne@complexio.eu)

**Laboratoire d'Economie des Transports**

**Charles RAUX**

ISH, 14 av Berthelot

F-69363 Lyon Cedex 07

Tél : 04 72 72 64 54

[charles.raux@let.ish-lyon.cnrs.fr](mailto:charles.raux@let.ish-lyon.cnrs.fr)



# SOMMAIRE

<b>SOMMAIRE .....</b>	<b>5</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES .....</b>	<b>7</b>
<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>9</b>
<b>1. PROBLEMATIQUE ET OBJECTIFS DU PROJET .....</b>	<b>13</b>
LES MESURES DE RATIONNEMENT DU CARBONE : TAXES ET PERMIS NEGOCIABLES.....	13
LA NOTION D'ARBITRAGE AU CENTRE DES DECISIONS LOGISTIQUES DES CHARGEURS .....	14
<b>2. METHODOLOGIE.....</b>	<b>17</b>
ELABORATION DES SCENARIOS DE RATIONNEMENT CARBONE .....	17
ELEMENTS SUR LE MODELE DE SIMULATION SANDOMA ET LES SCENARIOS <i>LOGISTIQUES</i> .....	17
ELEMENTS SUR L'INTEGRATION DE LA METHODE BILAN CARBONE® DE L'ADEME AU MODELE .....	19
DE L'ORGANISATION LOGISTIQUE DU CHARGEUR A L'ORGANISATION OPERATIONNELLE DU TRANSPORT.....	22
<b>3. PREMIERE SERIE DE SIMULATIONS : EVALUATION DE L'EFFICACITE DE MESURES DE RATIONNEMENT CARBONE SUR LES EMISSIONS DE GES DU TRANSPORT DE FRET .....</b>	<b>25</b>
RESEAUX DE DISTRIBUTION DEDIES AUX <i>PETITS</i> CLIENTS.....	26
RESEAUX DE DISTRIBUTION DEDIES AUX <i>GRANDS</i> CLIENTS .....	30
RESEAUX DE DISTRIBUTION <i>MIXTES</i> ET ENVOIS <i>MUTUALISES</i> .....	34
EN CONCLUSION : DES MESURES DE RATIONNEMENT CARBONE INEFFICACES SUR LES EMISSIONS DE GES DU TRANSPORT DE MARCHANDISES ?.....	37
<b>4. DEUXIEME SERIE DE SIMULATIONS : IDENTIFICATION DE GISEMENTS DE REDUCTION D'EMISSIONS DE GES ET EVALUATION DU COUT DU CARBONE <i>EVITE</i> .....</b>	<b>41</b>
OBJECTIFS DE CETTE SECONDE SERIE DE SIMULATIONS ET MODIFICATIONS APORTEES AU MODELE.....	41

AUTRES CARACTERISTIQUES DE LA DEUXIEME SERIE DE SIMULATIONS .....	45
SYNTHESE DES RESULTATS ET ANALYSES DE LA DEUXIEME SERIE DE SIMULATIONS.....	45
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>61</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>63</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>65</b>
<b>ANNEXE 1 : L'ORGANISATION LOGISTIQUE : QUELS ARBITRAGES POUR LES CHARGEURS ? QUEL ROLE POUR LA TAILLE DE L'ENVOI ?.....</b>	<b>67</b>
REFERENCES.....	79
<b>ANNEXE 2 : COUTS DE POSSESSION DES STOCKS ET MODELE D'ARBITRAGE ENTRE MODES DE TRANSPORT .....</b>	<b>81</b>
RÉFÉRENCES.....	100
<b>ANNEXE 3 : RESULTATS DETAILLES DE LA DEUXIEME SERIE DE SIMULATIONS DU PROJET CARBONE-FRET .....</b>	<b>103</b>

## LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES

Tableau 1 : Scénarios de rationnement carbone.....	17
Tableau 2 : Répartition des t-km par catégories de véhicules routiers.....	20
Tableau 3 : Estimation des émissions moyennes kg CO2-e par t-km par catégorie de PTAC.....	21
Figure 1 : schématisation d'un transport de colis avec passage par une plate-forme centrale de tri (soit 4 trajets dans cet exemple au total).....	23
Figure 2 : schématisation d'un transport de lots partiels (groupés sans passage par aucune plate-forme, soit un seul trajet réalisé par un ensemble tracteur/semi-remorque).....	23
Figure 3 : schématisation de différentes structures de distribution et de l'organisation possible du transport routier entre chaque niveau, en fonction de la taille de l'envoi (exemples de configurations pouvant être simulées avec le modèle).....	24
Figure 4 : Structures de distribution alternatives (SANDOMA V4) – envois à destination de petits clients.....	28
Tableau 4 : Première série de simulations, tableau synthétique des résultats pour les réseaux dédiés aux <i>petits</i> clients.....	29
Figure 5 : Structures de distribution alternatives (SANDOMA V4) – envois à destination de <i>grands</i> clients.....	32
Tableau 5 : Première série de simulations, tableau synthétique des résultats pour les réseaux dédiés aux <i>grands</i> clients.....	33
Tableau 6 : Première série de simulations, tableau synthétique des résultats pour les réseaux dits <i>mixtes</i> (tous types de clients).....	35
Tableau 6 (suite) : Première série de simulations, tableau synthétique des résultats pour les réseaux dits <i>mixtes</i> (tous types de clients).....	36
Tableau 7 : Scénario 2 rationnement carbone.....	37
Figure 6 : schématisation de différentes structures de distribution et de l'organisation possible du transport entre chaque niveau avec le mode ferroviaire (exemples de configurations pouvant être simulées avec le modèle SANDOMA V4).....	44

Tableau 8 : Deuxième série de simulations, valeurs des scénarios de référence (mode routier uniquement) .....	47
Tableau 9 : Scénarios de référence (mode routier uniquement), et scénarios de référence avec utilisation du mode ferroviaire (temps d'attente supplémentaire pour le fret de 24h)50	
Tableau 10 : Scénarios de référence (mode routier uniquement), et scénarios de référence avec utilisation du mode ferroviaire (temps d'attente supplémentaire pour le fret de 48h)51	
Tableau 11 : Scénarios de doublement des prix du carburant, <i>tout route</i> et avec le mode ferroviaire .....	53
Tableau 12 : Scénarios extrêmes de réduction des émissions de GES, <i>tout route</i> et avec le mode ferroviaire .....	55
Tableau 13 : Scénarios de recherche de la structure de distribution qui minimise les émissions de GES, <i>tout route</i> et avec le mode ferroviaire .....	57
Tableau 14 : Scénarios de recherche de la structure de distribution qui minimise les émissions de GES, avec doublement de la taille optimale de tous les envois, <i>tout route</i> et avec le mode ferroviaire .....	59

## Introduction

Pour réduire les émissions polluantes du transport de marchandises, les pouvoirs publics disposent notamment des deux instruments économiques suivants : la taxe et les marchés de permis. La taxe ou les permis négociables sont des instruments d'action publique qui modifient l'environnement économique des agents afin de les inciter à des changements de comportement. Le projet Carbone-Fret propose d'explorer ce que pourraient être les impacts du rationnement carbone dans le transport, que ce soit par la taxe ou par les permis, sur l'organisation des chaînes logistiques et *in fine* sur les émissions du secteur du transport de marchandises.

Cette analyse des effets de politiques de rationnement carbone se situe donc très en amont de l'organisation des transports. Elle prend en compte les effets possibles de ces instruments économiques dans les arbitrages qu'ont à effectuer les chargeurs du point de vue de leur organisation logistique de distribution (avec une reconfiguration possible de leur système logistique à moyen terme). Par *organisation logistique de distribution*, nous entendons l'ensemble du réseau de distribution par lequel circulent les flux de produits, depuis les unités de production jusqu'aux clients<sup>1</sup>, en passant éventuellement par un ou plusieurs sites de distribution (le terme de *logistique* est considéré ici dans son sens le plus large, c'est-à-dire l'organisation visant à optimiser la circulation de l'ensemble des flux, matériels et immatériels, dans le système de distribution). En se plaçant dans cette perspective logistique, située certes très en amont de l'organisation des transports, nous avons traité de la configuration des réseaux logistiques de distribution, mais nous n'avons pas omis pour autant de traiter de l'organisation du transport lui-même à chaque niveau du réseau (modes routier ou ferroviaire). En effet, il existe aussi des arbitrages relevant de décisions de court terme, qui ont des incidences directes sur le cadencement des envois et le stockage à tous les niveaux du réseau. De ces décisions résultent des organisations de transport très différentes, s'agissant du mode routier par exemple avec des offres allant de la messagerie au lot complet. Or les émissions de gaz à effet de serre (GES) sont fortement dépendantes du mode de transport utilisé, mais aussi du kilométrage et des différents types de véhicules utilisés pour chaque trajet routier.

Cette exploration des impacts de politiques de rationnement du carbone est réalisée au moyen d'un modèle de simulation systémique appelé SANDOMA. Dans sa dernière version, développée dans le cadre de ce projet, il permet de simuler l'organisation logistique optimale pour le chargeur (c'est-à-dire la configuration lui permettant de minimiser la somme de ses coûts de distribution), en réalisant un certain nombre de scénarios en particulier sur la valeur au kg du produit, et les quantités *émises* par le

---

<sup>1</sup> La logistique dite du *dernier kilomètre* n'est en revanche pas traitée dans ce projet.

chargeur, et d'évaluer les émissions de GES qui en résultent s'agissant notamment du transport routier (après y avoir associée la dernière version de la méthode Bilan Carbone® de l'ADEME<sup>2</sup>).

Dans une première série de simulations, un scénario de rationnement carbone équivalant à un doublement des prix du carburant a été simulé (sur la base des prix de la fin de l'année 2006). A l'issue de celle-ci, et au vue des résultats pour le moins peu probants du point de vue de leur incidence sur une réduction éventuelle des émissions de GES du transport, une deuxième série de simulations, sur la base d'objectifs très différents, a été proposée.

Premièrement, il a été décidé de modifier le modèle pour rechercher non plus seulement la configuration logistique qui conduisait au coût optimal de distribution pour le chargeur, mais dans le but d'identifier des gisements de réduction des émissions de GES. Les résultats de ces simulations ont, de fait, abouti à des organisations du système logistique différentes de la configuration optimale pour le chargeur (d'un point de vue économique). Elles ont ainsi permis, non seulement de déterminer où se situaient des potentiels de réduction significatifs des émissions de GES, mais également de proposer une évaluation du coût de la tonne CO<sub>2</sub>-e ainsi évitée, en calculant le coût supplémentaire induit par la réduction d'émission de GES (par rapport au coût optimal de distribution défini par le modèle).

Deuxièmement, nous avons cherché à identifier tous les segments de transport où l'usage du mode ferroviaire pouvait être envisagé. Cette option a été considérée dans les conditions les plus favorables possibles pour le mode ferroviaire, c'est-à-dire dans le cadre d'une offre de service cadencée et ponctuelle, proposée aux mêmes tarifs qu'un transport routier (y compris sur des distances pouvant être très inférieures à 500 km, dans la mesure où il y avait un transport massifié). Les émissions de GES ont ainsi été évaluées avec cette option de choix modal, en incluant différentes hypothèses de temps d'attente supplémentaire pour la marchandise par rapport à un transport uniquement routier. Ce temps d'attente a été évalué comme un coût logistique supplémentaire, selon des modalités expliquées dans ce rapport (directement fonction de la valeur au kg du produit) ; puis, de la même manière que pour le mode *tout route*, le coût de la tonne CO<sub>2</sub>-e ainsi évitée a été évaluée.

Après avoir présenté la problématique, les objectifs et la méthodologie utilisée dans le cadre de ce projet, nous proposons une analyse et une interprétation des résultats des deux grandes séries de simulations effectuées. Enfin, en conclusion de ce projet, nous donnons une synthèse de cette évaluation de l'efficacité de politiques de rationnement carbone sur le transport de marchandises, et proposons aussi de réfléchir sur d'autres voies qui

---

<sup>2</sup> Version V6, 2009.

pourraient conduire à des réductions substantielles des émissions de GES dans le transport de marchandises.



## **1. Problématique et objectifs du projet**

Les enjeux de cette recherche sont donc de mieux connaître la sensibilité de l'organisation logistique à des politiques de rationnement du carbone dans le transport, et la question posée est celle de l'évaluation des effets du rationnement carbone dans les décisions logistiques du chargeur (et donc le degré d'effectivité de ces politiques du point de vue des émissions du transport).

### **Les mesures de rationnement du carbone : taxes et permis négociables**

Ce rationnement du carbone dans le transport peut, rappelons-le, prendre la forme d'une taxe additionnelle sur les carburants (fixe comme la TIPP actuelle, ou augmenter progressivement comme cela est envisagé pour la taxe carbone), ou d'un système de permis. Une taxe contribuant à une augmentation des prix du carburant correspond, du point de vue du chargeur, à une augmentation des tarifs du transport routier au même titre que les hausses des prix du pétrole. Le permis, quant à lui, est un instrument qui peut correspondre à un signal-prix différent, et prendre place dans les décisions logistiques du chargeur comme un élément nouveau d'arbitrage, mais également comme un signal éventuellement plus *clair* sur les émissions de GES que ses arbitrages pourront engendrer (et éventuellement du point de vue de son bilan environnemental). Le système de quotas d'émission de CO<sub>2</sub> pour le transport de marchandises pourrait prendre la forme suivante.

Il comprend une autorité régulatrice et des acteurs qui interviennent sur un marché où s'échangent les quotas. Un quota est défini comme une autorisation d'émettre une tonne d'équivalent CO<sub>2</sub>.

Les agents dépositaires des obligations sont les consommateurs finaux de carburant fossile, c'est-à-dire les transporteurs publics ainsi que les entreprises possédant ou louant des véhicules de transport pour effectuer du transport en compte propre. Pour toute quantité de carburant fossile achetée (donc destinée à être brûlée), obligation est faite au consommateur de carburant de transférer à l'autorité régulatrice les quotas correspondants, qui sont alors annulés.

Le système proposé concerne l'ensemble des modes consommateurs de carburant fossile, à savoir la route, le fer, le fluvial, le maritime et l'aérien. Il couvre le territoire de l'Union Européenne.

En principe, il n'est prévu aucune allocation gratuite de quotas, ni aux chargeurs, ni aux transporteurs. Toutefois, pour améliorer l'acceptabilité du programme par les transporteurs, une allocation annuelle forfaitaire par véhicule, calculée selon la catégorie

de ce dernier, pourrait être mise en place. Cette allocation gratuite forfaitaire toucherait les véhicules exploités aussi bien en compte propre qu'en compte d'autrui.

Les chargeurs peuvent acheter des quotas sur le marché comme ils peuvent disposer de quotas dans le cadre du système européen actuel ETS.

Toute commande de transport par un chargeur faisant appel au compte d'autrui donne lieu à un transfert de quotas, ou à un paiement de quotas, *négocié librement* entre le chargeur et le prestataire de transport. Les quotas transférés du chargeur au transporteur viennent en débit du compte du premier et en crédit au compte du dernier. De même, la sous-traitance d'un envoi de fret par un organisateur de transport à un transporteur s'accompagne d'une négociation de paiement de quotas ou de transfert de quotas du compte de l'organisateur au compte du transporteur.

Les acteurs dont le compte en quotas est créditeur, peuvent vendre des quotas sur le marché. A échéance régulière, les acteurs dont le compte est débiteur ont obligation de transférer les quotas manquants à l'autorité régulatrice. Ils peuvent en acquérir sur le marché de quotas ou se libérer de l'obligation en acquittant une *surtaxe CO<sub>2</sub>*. Cette surtaxe s'appliquerait aux consommateurs de carburant ne souhaitant pas participer au marché.

Le marché de quotas relatif au transport de marchandises décrit ici, peut être isolé des autres marchés de quotas. Une alternative est une intégration directe du transport de marchandises dans le système européen d'échanges de quotas (*European Trading Scheme ETS*), comme semblent l'indiquer les réflexions en cours à la Commission Européenne. Dans ce cas, comme l'échange des quotas se fait sur la base des contenus en carbone, la fongibilité est totale avec le marché de permis européen voire mondial.

Le fonctionnement envisagé pour un marché de permis d'émission appliqué au transport de fret, comme la taxe carbone, posent de fait la question de l'évaluation du coût d'évitement de la tonne CO<sub>2</sub>-e. Cette notion de coût d'évitement a été placée au centre de la deuxième série de simulations que nous avons proposée dans le cadre de ce projet.

### **La notion d'arbitrage au centre des décisions logistiques des chargeurs**

Les arbitrages entre coûts et niveau de service jouent un rôle primordial dans les décisions logistiques des chargeurs, et dans leurs logiques d'organisation. Or un certain nombre de travaux et études récents montrent que les tendances actuelles des organisations logistiques et ces modes d'organisation prennent une part importante dans la génération des trafics routiers, et dans la croissance de la mobilité des marchandises, notamment du

point de vue de l'allongement des distances comme du cadencement des envois<sup>3</sup>. Evolutions, rappelons-le, qui sont observées et analysées grâce à diverses mesures statistiques (tonnes-km, tonnes chargées, véhicules-km), mais qui ne reflètent pas complètement ce que nous pouvons appeler la *morphologie* des flux de transport. Il s'agit notamment des phénomènes de massification des flux. Ces analyses se situent certes très en amont de l'organisation des transports, mais elles donnent une perspective essentielle dans le cadre actuel de la prospective des transports de marchandises, dans la mesure où ces modes d'organisation logistique déterminent largement l'organisation du transport : la distance de transport, la taille des envois, les exigences en matière de délais et de fréquence ont des incidences sur le choix modal et le choix du service de transport routier.

L'organisation du système logistique fait intervenir des décisions qui doivent être différenciées. Certaines sont d'ordre stratégique, et ont une influence sur l'organisation de la production et les structures de distribution, tandis que d'autres relèvent de tendances dans les modes de distribution des marchandises, et peuvent être qualifiées d'opérationnelles. Ces décisions font intervenir des arbitrages entre les coûts, liés à la production, au stockage et au transport, et la qualité de service souhaitée.

Du point de vue du donneur d'ordre, qu'il s'agisse d'un industriel ou d'un distributeur, ses décisions affectent l'organisation de ses flux de marchandises dans le réseau de distribution, en le conduisant à déterminer notamment :

- le degré de centralisation de la structure de distribution, avec le nombre de niveaux de distribution dans le réseau ;
- le nombre, la situation géographique et la fonction des centres de distribution à chaque niveau de distribution ;
- la taille (poids/volume) et la fréquence des envois.

L'ensemble de ces décisions vont ainsi influencer les distances moyennes de transport, le nombre des relations de transport, la taille des envois, ainsi que la distance totale de transport et les opportunités de massification des flux de transport. Elles vont aussi influencer différemment les coûts de transport et de stockage ; il s'agit de la notion essentielle d'arbitrage qui a été mise en avant pour la première fois dans les systèmes logistiques avec le modèle EOQ (Economic Order Quantity)<sup>4</sup>. A titre d'exemple, la centralisation des structures de distribution augmentera certes les distances moyennes à parcourir, mais aura également des incidences sur les niveaux de stockage, la massification éventuelle des envois. De fait, elle pourra aussi influencer la taille et la

---

<sup>3</sup> Voir à titre d'exemples sur ces sujets les travaux de McKinnon, le projet européen REDEFINE, la thèse de V.Gacogne.

<sup>4</sup> Le modèle EOQ est attribué à Arrow, Karlin et Scarf, 1958, et à Magee et Boodman, 1967.

fréquence des expéditions entre deux niveaux du réseau, sachant que de la taille de l'envoi dépendent les tarifs de transport, et que celle-ci a une incidence directe sur les stocks moyens et les coûts qu'ils engendrent.

Sans développer ici l'ensemble des arbitrages du système logistique qui interviennent dans le processus de décision du chargeur<sup>5</sup> (mais qui sont pris en compte dans le modèle SANDOMA), nous insisterons sur le rôle des coûts de transport et sur le fait que l'incidence d'une hausse des prix doit être analysée dans l'ensemble de ce système, et non pas uniquement sur la base de décisions prises indépendamment les unes des autres. Les coûts de transport du chargeur doivent être considérés à la fois comme une variable exogène par l'intermédiaire des prix de transport, sur lesquels peuvent agir les pouvoirs publics, et comme une variable endogène car ils sont aussi le résultat de l'organisation du système logistique. Ils interviennent dans les arbitrages, relevant de décisions de court et de long terme, mentionnés précédemment tels le nombre et la localisation des centres de stockage ou encore le cadencement des envois (taille et fréquence), et influencent directement les flux de transport. En d'autres termes, les coûts de transport peuvent être considérés, du point de vue du chargeur, comme le résultat de ses choix logistiques. Dans le même temps, ils sont influencés par les prix de transport, sur lesquels les pouvoirs publics ont les moyens d'agir, et de fait interviennent également dans les décisions à l'origine de l'organisation logistique. C'est pourquoi la *faiblesse* relative des prix du transport routier a souvent été perçue comme un élément de fondement des tendances récentes des organisations logistiques, comme étant une cause de la *consommation* accrue des transports. Mais ils prennent place dans des processus de décision plus complexes.

Pour ce projet, cette notion d'arbitrage est donc essentielle (voir aussi, en annexes 1 et 2, les développements à ce sujet réalisés dans le cadre de travaux antérieurs par les partenaires du projet). L'analyse de hausses du prix de transport par le biais de taxes, ou dans le cadre d'un système de permis négociables, doit être intégrée dans les décisions logistiques des chargeurs. Les effets de ces incitations seront ainsi analysés à partir des modes d'organisation logistique des chargeurs, et leur efficacité évaluée sur les émissions de GES que les flux de transport vont générer.

---

<sup>5</sup> Pour plus de développements voir les annexes 1 et 2 de ce rapport (l'annexe 1 est relative à une communication effectuée lors de la journée spéciale ECHO du 12 septembre 2007, organisée par l'INRETS au Ministère de la Recherche).

## 2. Méthodologie

### Elaboration des scénarios de rationnement carbone

Il s'agit de tester en parallèle, à fin de comparaison, différents niveaux de taxe (équivalent à une hausse du prix du transport) et de prix du permis d'émission. Des valeurs envisageables sont données dans le tableau ci-dessous, à partir d'un prix du gazole à 0,83 € HT (à fin 2006) et d'un prix du transport routier d'environ 0.04 €/t-km.

Les valeurs proposées ici, qu'il faut replacer dans une perspective future d'une dizaine d'années, peuvent paraître très élevées (bien qu'on ne puisse à notre avis les exclure dans la perspective d'une crise climatique à venir). Ces scénarios ont été affinés au fur et à mesure de la recherche en fonction des résultats des simulations.

	Taxe carbone (par litre de gazole)	Prix du permis (tonne de CO2)	Prix du carburant routier	Prix du transport / t-km (estimation)
Scénarios 1	0,41 €HT	155 €	+50%	+12%
Scénarios 2	0,81 €HT	310 €	+100%	+25%
Scénarios 3	1,21 €HT	460 €	+150%	+36%

**Tableau 1 : Scénarios de rationnement carbone**

Dans cette première phase du projet nous avons donc testé une augmentation des tarifs routiers, sur la base de ceux datant de la fin de l'année 2006 (tarifs réels pratiqués du colis de quelques kilos au lot complet). Il s'agit de la hausse correspondant au scénario 2, c'est-à-dire le scénario intermédiaire proposant un doublement des prix du carburant.

Ce scénario a été simulé en faisant varier simultanément des paramètres relatifs aux volumes émis par le chargeur, et à la valeur au kg du produit notamment (ces valeurs permettant de caractériser des grands types de produit), comme explicité ci-après.

### Eléments sur le modèle de simulation SANDOMA et les scénarios logistiques

Ce modèle propose d'analyser les flux de marchandises en se plaçant dans une perspective logistique, c'est-à-dire en simulant les modes d'organisation des chargeurs, et en se situant de fait en amont de l'organisation des transports. Il a été couplé dans cette version à la

méthode Bilan Carbone® de l'ADEME avec pour objectif d'évaluer les effets de politiques de rationnement carbone sur le système logistique du chargeur, et *in fine* sur les émissions de GES. Dans un premier temps, nous avons simulé une hausse du prix du carburant sur les émissions de GES du transport routier, sur la base des prix de la fin de l'année 2006 et en se plaçant à un horizon d'une dizaine d'années comme indiqué précédemment. Nous verrons que les scénarios ont été affinés dans une deuxième série de simulations.

Le modèle SANDOMA avait été profondément modifié dans sa version précédente (V3 en 2008), permettant ainsi par le biais de simulations spécifiques de déterminer la structure de distribution optimale pour le chargeur, c'est-à-dire la structure qui permet à la firme de minimiser ses coûts de distribution sur l'ensemble du réseau (somme des coûts de transport et des coûts intrinsèques des stocks). Cette version du modèle a été modifiée dans la première phase du projet Carbone-Fret sous deux aspects, en y intégrant d'une part la dernière version de la méthode Bilan Carbone® de l'ADEME (comme indiqué dans la section suivante), et en simulant d'autre part des réseaux destinés exclusivement à des *petits* et *grands* clients, puis à tous types de clients sous la forme d'envois dits *mutualisés* (il existe ainsi trois séries de simulation présentées dans la partie suivante du rapport).

La structure optimale du réseau de distribution est définie par le nombre de centres de distribution situés en amont et/ou en aval du réseau, les distances orthodromiques (à vol d'oiseau) à tous les niveaux du réseau, le poids et la fréquence des envois à tous les niveaux du réseau également. Cette structure dite *optimale* a été déterminée pour chacun des *scénarios logistiques*, présentés ci-dessous, dans un premier temps avec les tarifs du transport routier correspondant à la fin de l'année 2006, puis avec l'hypothèse de doublement des prix du carburant, comme indiqué précédemment.

Les simulations ont en outre été menées sur différentes plages de valeurs de paramètres, à savoir, dans le but de caractériser des grands types de produits :

- la valeur H.T. au kg du produit considéré (variant entre 1, 10, 100 et 600 euros/kg) ;
- les volumes de production circulant dans le réseau de distribution, c'est-à-dire les quantités *émises* depuis les sites de production du chargeur (quantités variant de 5 à 50 000 tonnes de produits par mois selon les scénarios) ;

Les volumes ainsi expédiés par chaque établissement, situé à l'intérieur du réseau de distribution, peuvent être très inférieurs à ceux expédiés par la firme en amont du réseau (unités de production ou sites de distribution amont). Ils varient en effet selon la configuration du réseau de distribution (plus ou moins centralisée ou hiérarchisée), et peuvent conduire pour certains établissements à des volumes relativement faibles. De manière imagée, le réseau de distribution est irrigué en amont par les unités de production avec des ramifications plus ou moins nombreuses (liaisons du réseau), plus ou moins

longues (distances entre les établissements), et plus ou moins *épaisses* (intensité de la liaison du point de vue des volumes) conduisant à leurs extrémités aux clients. Ces plages de valeur ont été retenues sur la base de travaux réalisés à partir des données des enquêtes Chargeur de 1988 et ECHO 2004 (Gacogne, 2008, projet TEOL travail réalisé avec l'INRETS).

Les résultats sont présentés dans la partie suivante sous forme de tableaux avec des variables de *sortie* choisies dans le modèle, ces variables permettent de définir d'une part les caractéristiques de la structure de distribution optimale avec les émissions de GES qui en résultent (présentées notamment par tonne et par envoi), et d'autre part de présenter un certain nombre d'éléments qui nous semblaient importants. Il s'agit entre autres du coût unitaire (par produit) de distribution (très variable selon les scénarios – il correspond aux coûts du transport et aux coûts intrinsèques des stocks), ou encore des quantités de produits immobilisées dans le réseau qui sont des indicateurs significatifs à plusieurs titres... Enfin le type de transport à tous les niveaux du réseau tel qu'il y figure dans la typologie transport de l'ADEME.

Dans le modèle SANDOMA, plusieurs types de structures de distribution ont été considérées ; elles sont illustrées par les diagrammes suivants, mais elles peuvent être différenciées également selon les types de destinataires, dénommés *petits clients* et *grands clients*. En effet, une épicerie par exemple ne peut être considérée comme un entrepôt de la grande distribution ; la taille des commandes, les exigences et les contraintes sont bien évidemment très différentes. Les réseaux ont donc été distingués selon les destinataires, les grands clients, qui ne pourront être que la grande distribution ou des grossistes dans l'exemple cité, et les petits clients. La première série de simulations distingue ainsi ces deux types de clients et les traite indépendamment, puis simultanément, et les résultats, comme nous pourrions le constater, sont assez différents.

Enfin, il est important de garder à l'esprit que le modèle ne détermine pas seulement la structure optimale du réseau de distribution en définissant le degré de centralisation et de hiérarchisation de ce dernier tel qu'il figure sur les schémas. Le modèle va aussi déterminer le nombre de centres à chaque niveau, et donc leur rayonnement géographique et les distances qui vont en découler (cela influence également le taux de rotation des stocks, le nombre de liaisons de transport dans les réseaux, etc.).

### **Eléments sur l'intégration de la méthode Bilan Carbone® de l'ADEME au modèle**

*La méthode Bilan Carbone a pour objectif de permettre à une entreprise, une administration ou association, ou plus généralement à toute entité fournissant un produit ou un service, fût-ce de l'information, d'estimer les émissions de gaz à effet de serre dont elle est à l'origine, directement ou indirectement, c'est-à-dire d'évaluer son impact global*

en matière d'émissions de gaz à effet de serre [...]. Il en va notamment ainsi des émissions engendrées par les transports consommés par l'activité, qu'il s'agisse d'amener les salariés au travail le matin, ou de celles liées au fret le cas échéant.<sup>6</sup>

Cette méthode est globale et les émissions du transport routier de fret n'en constituent qu'une partie ; l'un des objectifs de la méthode étant naturellement d'en identifier les réductions possibles, à court comme à long terme. Il est important de noter qu'elle a été mise au point de sorte à pouvoir réaliser une estimation des émissions quelles que soient les données disponibles par l'entité, en se basant notamment sur des facteurs d'émissions moyens, et en proposant pour les transports plusieurs méthodes de calcul possibles.

L'une de ces méthodes propose de reconstituer l'organisation du transport routier en fonction de la taille de l'envoi (c'est-à-dire le poids de l'envoi éventuellement corrigé sur la base d'un indice volumique), et connaissant les lieux d'expédition et de destination, d'évaluer ainsi les tonnes-km moyennes parcourues par les différentes catégories de véhicules susceptibles d'être utilisés (voir le premier tableau ci-dessous)<sup>7</sup>. A chacune de ces catégories correspond un taux d'émission moyen à la tonne-km, qui a été défini par défaut dans le tableur Emissions transport fourni par l'ADEME (voir le second tableau ci-dessous). Ce mode de calcul est particulièrement utile à un chargeur qui ne connaît pas l'organisation ni les moyens utilisés par l'opérateur de transport routier auquel il fait appel.

t.km véhicule	Répartition par catégorie de véhicule	
t.km camionnette	24,65%	PTAC 1,5 à 2,5 t diesel
	37,68%	PTAC 2,6 à 3,4 t diesel
	37,68%	PTAC 3,5 t
t.km porteur	2,80%	PTAC 6,1 à 10,9 tonnes
	69,01%	PTAC 11 à 19 tonnes
	2,77%	PTAC 19,1 à 21 tonnes
	25,42%	PTAC 21 à 32,6 t
t.km semi	100,00%	Tracteurs routiers

**Tableau 2 : Répartition des t-km par catégories de véhicules routiers**

Source : Bilan Carbone® de l'ADEME (statistiques nationales), Tableur module GES transports

<sup>6</sup> extrait du document *Bilan Carbone™ d'une activité industrielle ou tertiaire* (p.9, 2004)

<sup>7</sup> Voir le *tableur tkm* de l'ADEME (version novembre 2005) et son manuel d'utilisation.

Catégorie de PTAC	kg CO2-e par t.km
1,5 à 2,5 tonnes diesel	1,331
2,6 à 3,4 tonnes diesel	0,998
3,5 tonnes	0,982
6,1 à 10,9 tonnes	0,435
11 à 19 tonnes	0,226
19,1 à 21 tonnes	0,217
plus de 21 tonnes	0,196
tracteurs routiers	0,087

**Tableau 3 : Estimation des émissions moyennes kg CO2-e par t-km par catégorie de PTAC**

Source : Tableau issu du Bilan Carbone® version 6 de l'ADEME (Fret routier, calculs à partir des tonnes-km) - Valeurs introduites dans le modèle SANDOMA V4

Notes : les parcours à vide sont pris en compte dans cette évaluation des émissions de GES par t-km ;

De 1,5 à 3,5 tonnes de PTAC on parlera de *camionnettes*, de *porteurs* au-delà, et pour la dernière catégorie d'ensembles *tracteur/semi-remorque*.

C'est donc à partir de la taille de l'envoi que l'entité va pouvoir déterminer l'organisation du transport. Cinq types de transport, dénommés de la manière suivante, ont été utilisés dans la méthode Bilan Carbone® :

1. Monocolis (type non considéré dans les séries de simulations)
2. Messagerie ]0 – 100 kg[  
Porteur (collecte) → semi → porteur (distribution)
3. Réseau [100 kg – 3 tonnes[  
Porteur (collecte) → semi → porteur (distribution)
4. Lot technique [3 tonnes – 18 tonnes[  
Semi (collecte) → semi → semi (distribution)
5. Complet [18 tonnes – 25 tonnes]  
Transport direct avec semi-remorque

Sur la base de cette typologie *transport* décrite ci-dessus et d'une typologie *département* non détaillée ici, une évaluation des tonnes-km parcourues peut être réalisée par type de véhicule. Cette évaluation moyenne des tonnes-km effectuées par type de véhicule est

ensuite mise en correspondance avec les différentes classes de PTAC existantes, et permet ainsi une évaluation des émissions de GES du mode routier.

Dans le modèle SANDOMA, cette typologie transport a donc été reprise, en y ajoutant un type appelé « 0 » correspondant à des tournées de livraison effectuées à partir d'un site de distribution appartenant au chargeur, situé de fait en aval du réseau (sur la base d'un véhicule de type porteur).

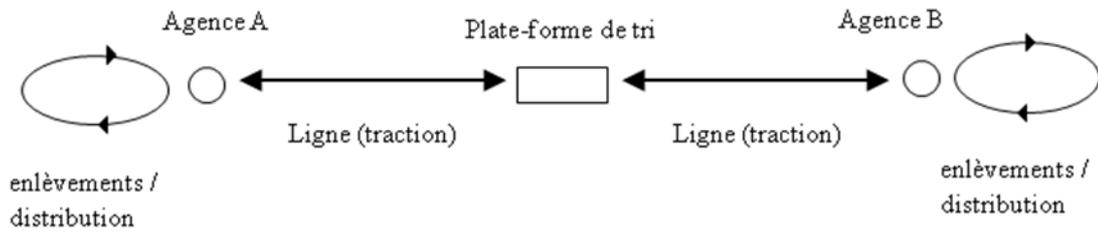
Pour le mode ferroviaire, nous avons retenu les valeurs données par le Bilan Carbone® V6, soit pour un train en France 0,010 kg CO<sub>2</sub>-e par tonne-km en moyenne.

### **De l'organisation logistique du chargeur à l'organisation opérationnelle du transport**

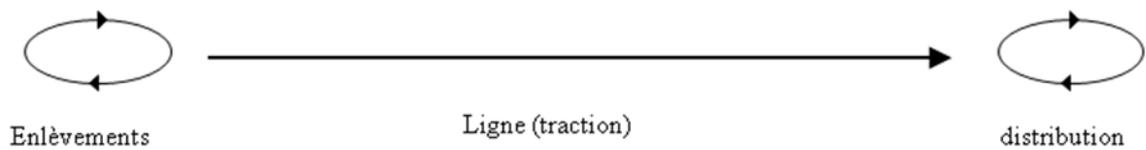
Nous pouvons considérer que le modèle comporte ainsi en quelque sorte deux couches, la première est celle de l'organisation logistique du chargeur comprenant différentes structures de distribution (plus ou moins hiérarchisées, avec un nombre de centres de distribution différents à chaque niveau, des distances variées entre les différents niveaux du réseau). Les simulations du modèle ont pour objectif, compte tenu de la valeur du produit, des quantités, du type de client (*petit* ou *grand*), de l'aire de chalandise, des prix de transport, de déterminer la structure optimale : cet optimum correspond à la minimisation de la somme des coûts de distribution du chargeur.

La seconde couche est celle de l'organisation du transport lui-même à laquelle, compte tenu du poids de l'envoi et de la distance entre deux niveaux du réseau, correspond une offre adaptée du transport (il s'agit d'un aspect purement opérationnel de l'organisation logistique).

S'agissant du mode routier, la typologie transport de l'ADEME reprend bien les différentes offres allant du mono-colis au lot complet, il en résultera un nombre de trajets différent (passage par exemple par une plate-forme centrale de tri), des distances totales parcourues différentes et par des types de véhicules distincts (nous proposons deux illustrations ci-dessous des différents types d'organisation possibles du mode routier). Cette seconde *couche* est naturellement essentielle du point de vue l'évaluation des émissions de gaz à effet de serre. Elle est prise en compte dans les simulations du modèle et est, en quelque sorte, imbriquée dans l'organisation *stratégique* du chargeur (c'est-à-dire celle qui détermine la configuration optimale du réseau, voir en illustration la figure 3). Nous verrons que dans une seconde phase de ce projet, et sur la base des résultats de la première série de simulations, nous sommes allés plus loin en considérant aussi le mode ferroviaire, et en adaptant le modèle SANDOMA pour réaliser de nouveaux scénarios.



**Figure 1 : schématisation d'un transport de colis avec passage par une plate-forme centrale de tri (soit 4 trajets dans cet exemple au total)**



**Figure 2 : schématisation d'un transport de lots partiels (groupés sans passage par aucune plate-forme, soit un seul trajet réalisé par un ensemble tracteur/semi-remorque)**

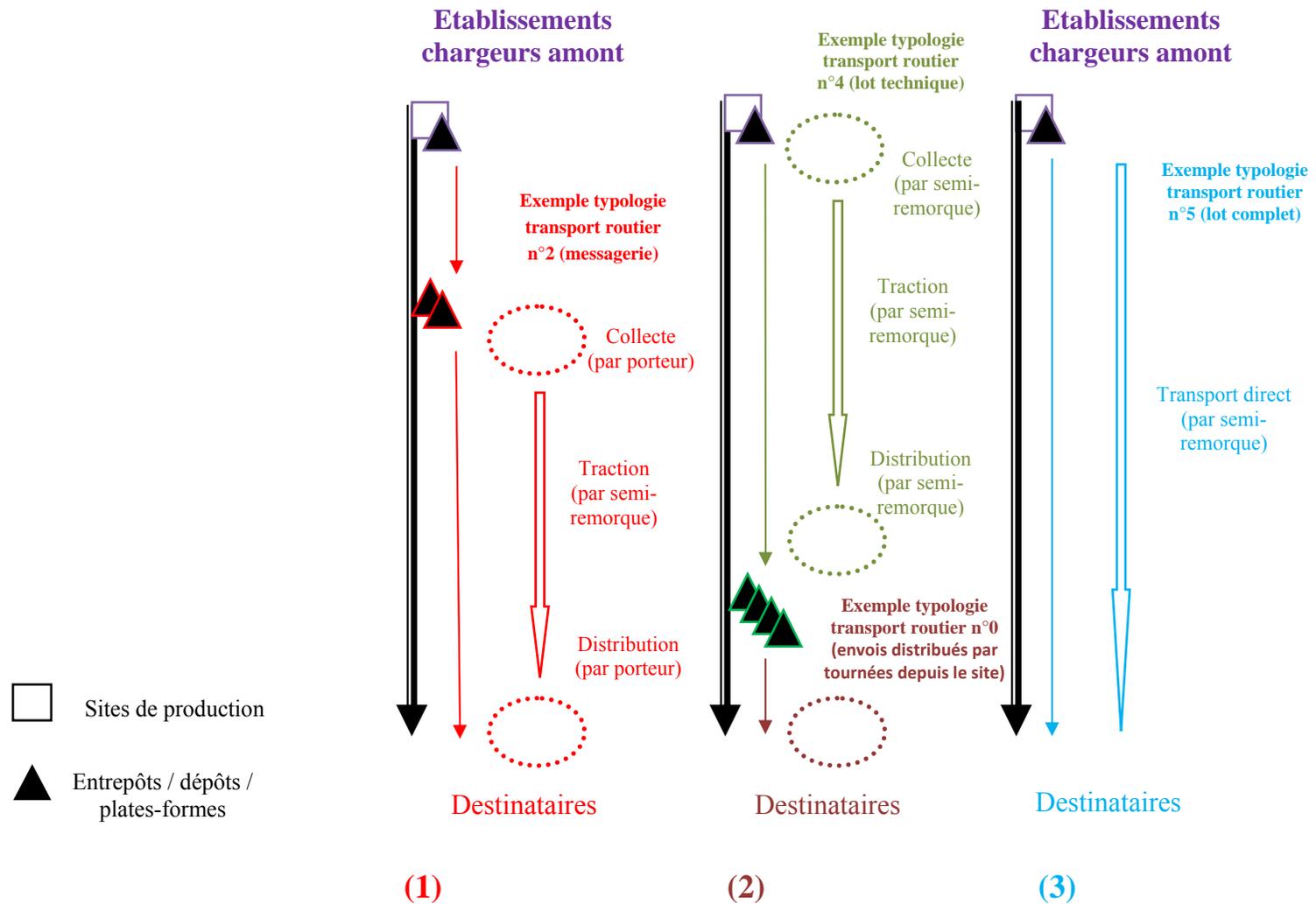


Figure 3 : schématisation de différentes structures de distribution et de l'organisation possible du transport routier entre chaque niveau, en fonction de la taille de l'envoi (exemples de configurations pouvant être simulées avec le modèle)

### **3. Première série de simulations : évaluation de l'efficacité de mesures de rationnement carbone sur les émissions de GES du transport de fret**

Comme indiqué plus haut nous avons réalisé, dans cette première phase du projet, différentes simulations selon le type de clients, en considérant tout d'abord indépendamment les *petits clients* puis les *grands clients*, et enfin des réseaux *mixtes* (c'est-à-dire fournissant les deux). Les résultats sont en effet très différents selon les quantités livrées aux destinataires, et replacent en quelque sorte la *demande* au cœur de tendances logistiques récentes (point qui ne sera pas développé ici, n'étant pas notre sujet). Lorsque les clients ont une capacité à massifier les volumes (tels la grande distribution ou des grossistes), ils ont aussi cette aptitude à accroître la vitesse de circulation des flux, et donc à réduire le temps d'immobilisation des produits dans les réseaux. En d'autres termes, cela leur permet d'augmenter le taux de rotation des stocks qui, rappelons-le, est devenu pour nombre d'entreprises un ratio financier d'importance lié au coût du capital immobilisé ; ce qui peut leur conférer naturellement un avantage concurrentiel important. C'est la raison pour laquelle nous avons retenu dans les résultats le coût de distribution par produit qui, bien entendu, dépend ainsi fortement de la valeur au kg du produit. Plus la valeur au kg du produit est élevée, plus les coûts intrinsèques des stocks deviennent élevés avec la durée d'immobilisation du produit dans le réseau. Ce temps d'immobilisation est donné dans les tableaux en nombre de jours, il est donc *symptomatique* de la vitesse de circulation des flux matériels qui dépend ainsi, elle-même, de la valeur du produit et des quantités qui circulent.

Nous avons précisé, par ailleurs, dans les tableaux synthétisant les résultats de cette première série de simulations :

- le nombre de sites de distribution entre les unités de production et les clients, et s'il existe plusieurs niveaux (voir à titre d'illustration la structure hiérarchisée à 3 niveaux pour les petits clients, notée (1) dans le diagramme suivant) ;
- les distances orthodromiques moyennes (à vol d'oiseau) entre les différents niveaux du réseau ;
- les poids des envois et leur fréquence à tous les niveaux du réseau ;
- le type de transport pour chacun de ces envois (conformément à la typologie de l'ADEME décrite plus haut ; cette typologie transport va correspondre, pour le mode routier, à des organisations de transport différentes : messagerie - jusqu'à 100 kg -, *réseau* - jusqu'à 3 tonnes -, lot partiel - de 3 tonnes à 18 tonnes - et enfin lot complet au-delà. Nous avons rajouté un type supplémentaire pour les tournées

de distribution effectuées à partir des centres de distribution du chargeur situés en aval du réseau du chargeur ;

- la distance réelle en km parcourue par les différentes catégories de véhicule compte tenu de la typologie transport ;
- les émissions de GES par tonne de produit, mais également en les différenciant selon l'envoi, et le type de clients.

Pour la lecture des résultats, il est nécessaire de se référer aux diagrammes des structures de distribution, schématisées ci-après. Ils permettent de repérer à quel type de configuration logistique nous avons affaire, avec des structures plus ou moins hiérarchisées ; les simulations permettant à chaque fois de déterminer la configuration optimale pour le chargeur selon les scénarios (minimisation de la somme de ses coûts de distribution). A l'évidence, la lecture détaillée des résultats n'est ni évidente, ni immédiate, mais pour chercher à identifier des leviers dans cette croissance de la demande de transport de marchandises et les émissions de GES, il nous faut comprendre les modes d'organisation des chargeurs qui sont devenus complexes, et leurs déterminants.

Il faut considérer enfin, dans les résultats de ces simulations, qu'il s'agit d'une hausse du prix du carburant à un horizon de 10 ans, et que la réponse peut induire une reconfiguration du système logistique entre ces deux dates. La simulation d'une réponse à court terme, c'est-à-dire sans modification possible immédiate de la structure des réseaux porterait principalement sur le cadencement des envois à tous les niveaux du réseau. Or ici nous allons constater qu'il y a bien une incidence sur les distances parcourues (même faible), en même temps que sur le cadencement des envois (poids et fréquence).

### **Réseaux de distribution dédiés aux *petits clients***

Quatre structures de distribution distinctes peuvent résulter des différents scénarios, elles sont présentées sur la figure suivante (numérotées de 1 à 4, de gauche à droite, de la structure la plus hiérarchisée à la plus centralisée).

La lecture des résultats nous indique, cependant, que la structure la plus hiérarchisée (1) n'existe pas dans les simulations dédiées aux *petits clients*. Elle n'apparaît que dans les simulations qui associent tous types de clients (réseaux *mixtes*), c'est-à-dire lorsque les quantités sont suffisamment importantes pour que la massification des envois offre un avantage économique (en amont du réseau). Il faut, d'autre part, que la valeur du produit soit suffisamment faible pour que la massification des petits envois vers l'aval présente aussi un avantage économique (elle permet certes de réduire les coûts de transport, mais

augmente simultanément de façon importante les stocks). De fait, cette structure ne peut exister que dans les simulations qui associent les volumes destinés aux grands et petits clients, grâce à des envois mutualisés en amont du réseau.

La structure la plus hiérarchisée pour ces simulations sera donc celle à deux niveaux, la présence des sites de distribution intermédiaires (appelés C1) peut apparaître théoriquement en amont ou en aval du réseau (structures 2 et 3 sur le diagramme). Lorsqu'ils se situent en aval (structure 3), cela signifie que les envois sont massifiés pour réaliser principalement des gains sur les coûts de transport, puis les envois sont livrés à partir de ces sites sous forme de circuit de distribution (circuits qui peuvent être identifiés par la typologie transport « 0 » créée dans le modèle, ou par la distance  $D_s$  relativement faible et permettant ainsi d'organiser des tournées de livraison à partir du site de distribution). Logiquement c'est cette dernière que nous retrouvons s'agissant des petits clients, puisque les quantités commandées les caractérisant restent toujours relativement faibles (nous les avons fixées ici de 5 à 500 kg maximum pour les produits les moins chers, soit du colis à la palette, cette taille d'envoi est indiquée par la variable  $T_s$ ). La structure à deux niveaux, numérotée 2, n'existera en fait que lorsqu'il y aura des envois mutualisés avec les volumes des grands clients, c'est-à-dire là encore dans les dernières simulations de cette première phase.

A l'inverse, les livraisons directes depuis des unités de distribution présentent un intérêt pour les produits à forte valeur, et avec des quantités livrées aux clients relativement faibles. Pour effectuer des envois *plus lourds* et bénéficier de tarifs de transport plus avantageux, il faudrait accroître les stocks, soit le temps d'immobilisation des produits, ce qui ne peut être que très coûteux pour des produits chers. Ces quelques éléments rappellent toute l'importance des arbitrages qu'ont à effectuer en permanence les chargeurs, et qui dépendent fortement du type de produit, et de manière générale, des quantités à livrer.

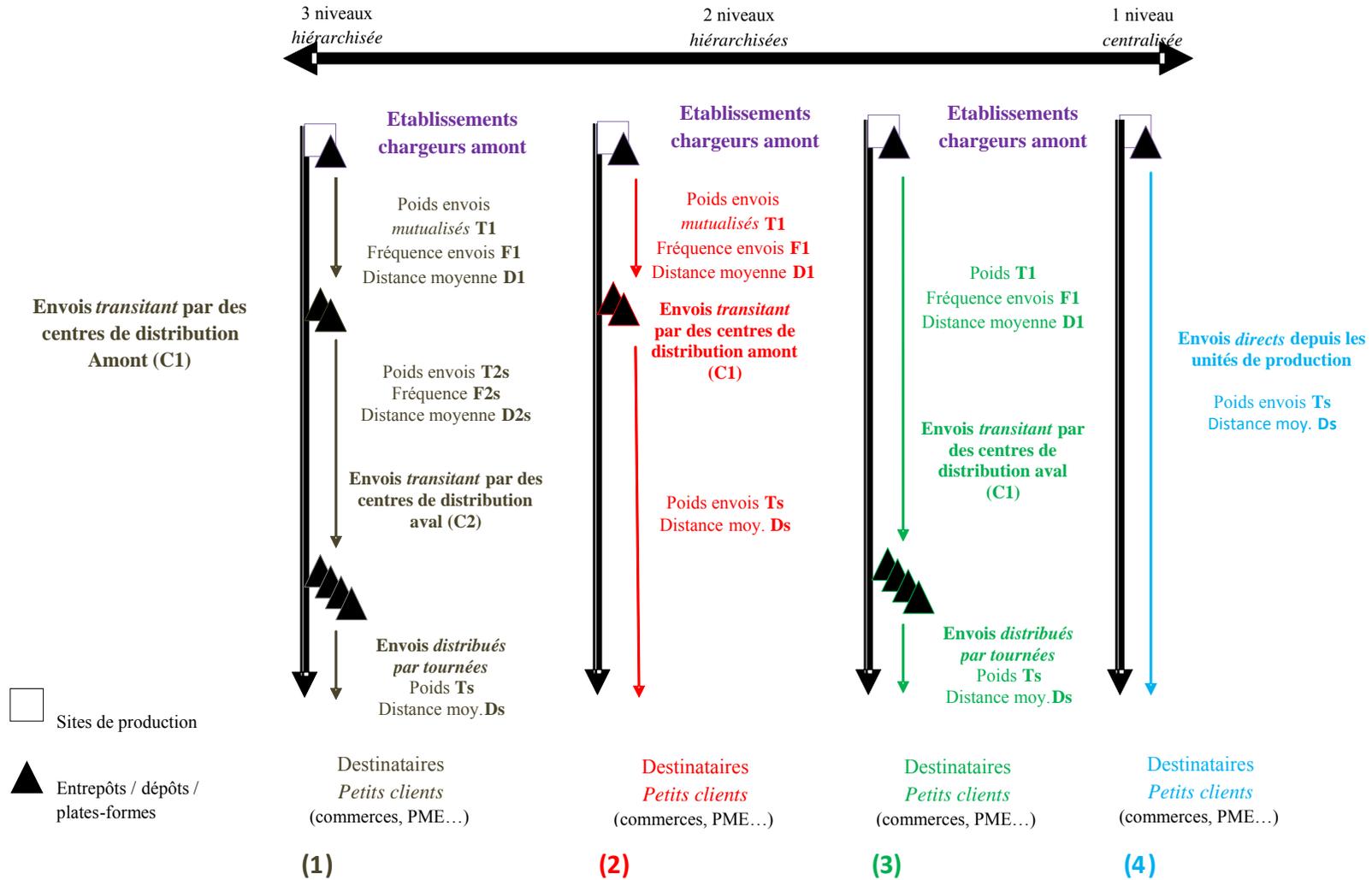


Figure 4 : Structures de distribution alternatives (SANDOMA V4) – envois à destination de petits clients

(0)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)	(19)
(Type de simulation effectué) l'organisation logistique résulte de la recherche de l'optimum du coût de distribution pour le chargeur	Quantité mensuelle expédiée par la firme (paramètre 1 simulations)	Valeur H.T. au kg du produit (paramètre 2 simulations)	Livraison directe (oui:1; non:0)	Structure 2 niveaux (oui:1; non:0)	Stocks (en nombre de jours dans le réseau)	Nombre centres distribution C1 (centres intermédiaires)	Poids envoi T1 (tonnes)	Fréquence envoi F1	D1 (km) Distance orthodromique	Type Transport envoi T1 (2: messagerie; 3: réseau; 4: lot; 5: complet)	Poids envoi Ts (tonnes)	DS (km) Distance orthodromique	Type Transport Envoi Ts (0: tournées de distribution; 2: messagerie)	Distance totale réelle parcourue (km route)	Emissions kg CO2-e / tonne produit	var en % Emissions CO2-e par rapport au scénario de référence	Coût de distribution par produit si réseau à 2 niveaux	Coût de distribution par produit si livraison directe	var en % du coût de distrib moyen par rapport au scénario de référence
Scénarios référence (prix carburant fin 2006)	5 tonnes	10 €/kg	0	1	48	75	0,18	0,3	229	3	0,005	56	0	345	46		2,70	3,47	
		100 €/kg	0	1	8	29	0,07	2,1	229	2	0,005	90	0	378	53		3,43	3,47	
		600 €/kg	1	0	3						0,005	229	2	289	33		3,52	3,49	
Scénarios hausse de 100% prix du carburant (fin 2006)	5 tonnes	10 €/kg	0	1	55	89	0,18	0,3	229	3	0,005	52	0	340	45	-2	2,78	3,85	3
		100 €/kg	0	1	9	35	0,07	1,8	229	2	0,005	83	0	371	52	-3	3,62	3,85	5
		600 €/kg	1	0	3						0,005	229	2	289	33	0	3,87	3,87	11
Scénarios référence (prix carburant fin 2006)	50 tonnes	10 €/kg	0	1	24	120	0,57	0,7	229	3	0,005	44	0	333	43		2,29	3,47	
		100 €/kg	0	1	5	73	0,18	3,4	229	3	0,005	57	0	346	46		2,73	3,47	
		600 €/kg	0	1	2	39	0,11	10,0	229	3	0,005	78	0	367	51		3,44	3,47	
Scénarios hausse de 100% prix du carburant (fin 2006)	50 tonnes	10 €/kg	0	1	26	120	0,63	0,6	229	3	0,005	44	0	333	43	0	2,32	3,85	1
		100 €/kg	0	1	6	86	0,18	2,9	229	3	0,005	52	0	341	45	-2	2,81	3,85	3
		600 €/kg	0	1	2	43	0,10	10,0	229	3	0,005	74	0	363	50	-2	3,59	3,85	4
Scénarios référence (prix carburant fin 2006)	500 tonnes	10 €/kg	0	1	10	107	2,6	1,6	229	3	0,05	47	0	336	44		0,62	0,86	
		100 €/kg	0	1	2	39	1,1	10,0	229	3	0,05	78	0	366	51		0,80	0,86	
Scénarios hausse de 100% prix du carburant (fin 2006)	500 tonnes	10 €/kg	0	1	12	120	2,7	1,4	229	3	0,05	44	0	333	43	-1	0,66	0,99	6
		100 €/kg	0	1	3	48	1,1	8,6	229	3	0,05	70	0	359	49	-3	0,86	0,99	8
Scénarios référence (prix carburant fin 2006)	5 000 tonnes	1 €/kg	0	1	11	120	25,0	1,5	229	5	0,5	44	0	273	30		0,15	0,21	
		10 €/kg	0	1	4	59	15,3	5,0	229	4	0,5	63	0	352	39		0,18	0,21	
Scénarios hausse de 100% prix du carburant (fin 2006)	5 000 tonnes	1 €/kg	0	1	11	120	25,0	1,5	229	5	0,5	44	0	273	30	0	0,16	0,25	10
		10 €/kg	0	1	4	72	15,6	4,0	229	4	0,5	57	0	346	38	-3	0,19	0,25	11

Tableau 4 : Première série de simulations, tableau synthétique des résultats pour les réseaux dédiés aux *petits* clients

Remarques concernant le tableau précédent (valables pour tous les autres tableaux de résultats) : les valeurs figurant dans les tableaux sont arrondies ; les coûts de distribution ne tiennent pas compte des coûts logistiques liés à l’approvisionnement (logistique amont), ni des stocks de sécurité (ne s’agissant pas de cas d’application réels), les coûts réels seraient supérieurs ; les distances D1 sont *invariantes* du fait que nous n’avons pas effectué de scénarios sur la concentration éventuelle des sites de production ou sites de distribution amont (en d’autres termes, les aires de chalandise de ces sites en amont du réseau sont fixes ; mais les distances moyennes obtenues avec les différentes simulations restent ainsi cohérentes avec les résultats des enquêtes chargeurs menées en France).

Les résultats synthétiques de ce premier scénario de rationnement carbone, correspondant à un doublement des prix du carburant (sur la base des prix de la fin de l’année 2006), nous enseignent que les incidences du point de vue des émissions de GES sont faibles (réduction nulle ou pouvant aller jusqu’à 3% dans le meilleur des cas), alors que le coût de distribution peut, selon les quantités et la valeur au kg du produit, subir une augmentation significative. Ce scénario va être testé successivement sur des réseaux dédiés aux *grands* clients, de fait traitant de volumes de commandes beaucoup plus élevés, puis sur des réseaux dits *mixtes*, dédiés à des clients de toute taille, c’est-à-dire pouvant traiter des volumes de commandes très distincts.

### **Réseaux de distribution dédiés aux *grands* clients**

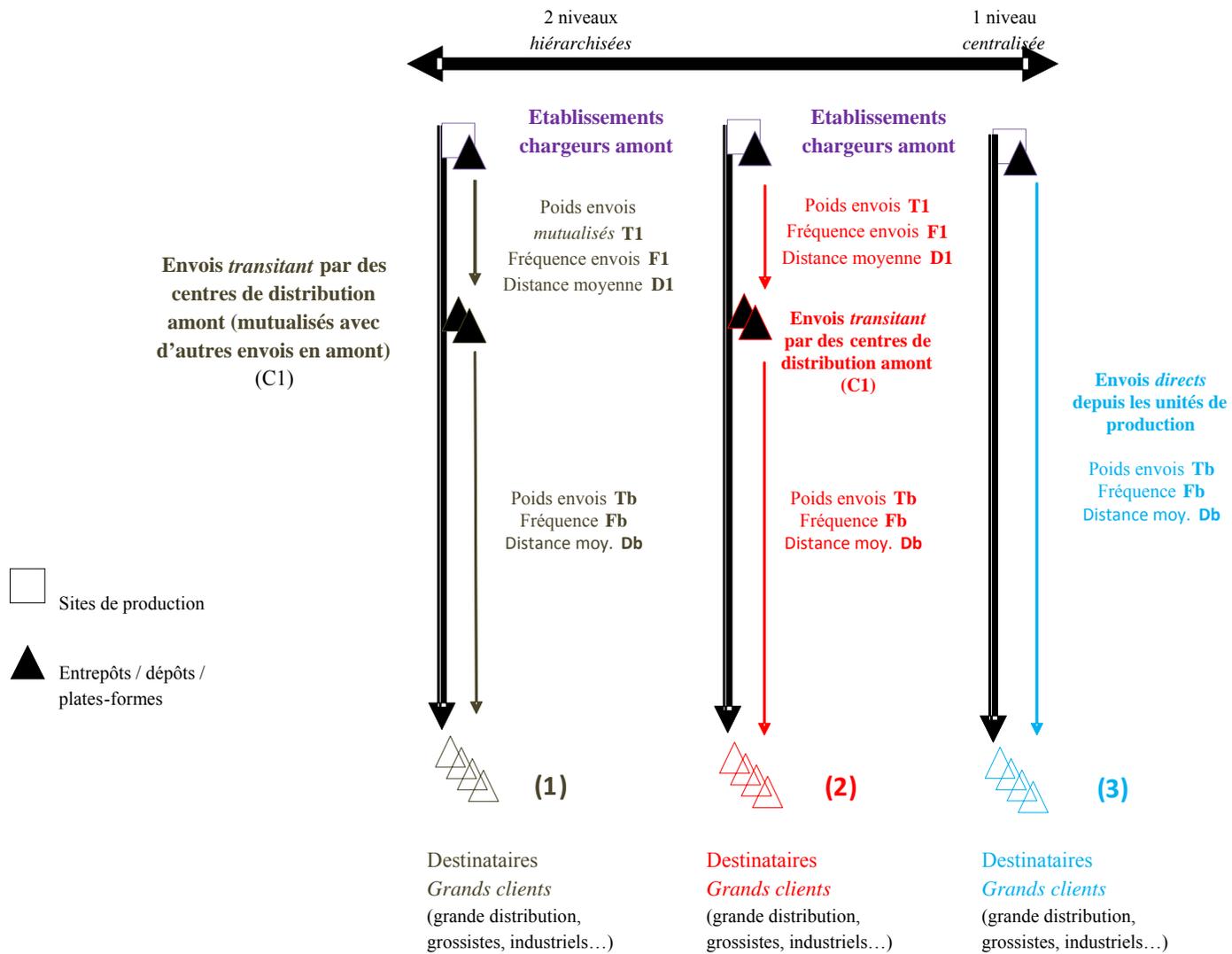
Pour les réseaux *grands* clients, deux cas peuvent se présenter :

- soit il s’agit d’envois directs depuis les unités de production (structure 3 sur le diagramme suivant), constitués par des lots complets, c’est-à-dire lorsque les quantités sont très importantes, et s’agissant naturellement de produits dont les valeurs ne peuvent être extrêmes (les résultats étant irréalistes avec des produits par exemple à 600 euros au kg) ;
- soit il s’agit d’envois transitant par des centres de distribution intermédiaires (appelés C1 sur les figures schématisant les structures de distribution numérotées 1 et 2).

Le poids de l’envoi destiné aux grands clients, appelé Tb, n’est pas fixé *a priori* comme c’était le cas pour les petits clients. Nous avons considéré dans la construction du modèle que les quantités devaient permettre à ce type de clients de fixer lui-même la taille optimale de sa commande, c’est-à-dire en calculant son propre optimum entre coûts de transport et de stockage. D’ailleurs, comme l’indiquent les schémas, nous considérons que le lieu de destination est à apparenter à un site de distribution, où il peut y avoir du stockage (plate-forme d’un distributeur, grossiste ou encore d’un industriel).

Le coût de distribution unitaire permet de vérifier immédiatement que ce type de client réalise des gains importants sur la distribution grâce à ses volumes, par rapport à un petit client, pour des caractéristiques identiques de valeur au kg du produit notamment. En revanche, à volume égal émis par le chargeur et à valeur égale de produit, il apparaît que ces grands clients ne sont pas plus vertueux du point de vue des émissions de GES. On peut prendre à titre de comparaison le volume de 50 tonnes de marchandises émis par le chargeur en amont du réseau et le produit à 10 euros au kg, ceci s'explique par le fait que les petits envois sont massifiés vers l'aval du réseau, puis distribués sous forme de tournées de livraison. Pour la même raison, on peut observer que les produits restent immobilisés deux fois plus longtemps dans le réseau dédié aux petits clients, ceci expliquant une telle différence dans leurs coûts unitaires de distribution (par produit), pour les mêmes produits et les mêmes quantités totales circulant dans le réseau.

Enfin, en conclusion, nous pouvons constater que l'effet incitatif de ce scénario de rationnement carbone n'est guère plus encourageant que dans les résultats présentés pour les réseaux dédiés *petits clients*.



**Figure 5 : Structures de distribution alternatives (SANDOMA V4) – envois à destination de *grands clients***

(0)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)
(Type de simulation effectué) l'organisation logistique résulte de la recherche de l'optimum du coût de distribution pour le chargeur	Quantité mensuelle expédiée par la firme (paramètre 1 simulations)	Valeur H.T. au kg du produit (paramètre 2 simulations)	Stocks (en nombre de jours dans le réseau)	Nombre centres distribu- tion C1 (centres intermédi- aires)	Poids envoi T1 (tonnes)	Fréquence envoi F1	D1 (km) Distance orthodrom- ique	Type Transport envoi T1 (3: réseau; 4:lot; 5:complet)	Poids envoi Tb (tonnes)	Fréquence envoi Fb	Db (km) Distance orthodromi- que	Type Transport Envoi Tb (2: messagerie; 3: réseau; 4:lot)	Distance totale réelle parcourue (km route)	Emissions kg CO2-e / tonne produit	var en % Emissions CO2-e par rapport au scenario de référence	Coût de distribution par produit	var en % du coût de distrib moyen par rapport au scenario de référence
Scénarios référence (prix carburant fin 2006)	50 tonnes	10 €/kg	11	10	2,18	2,0	229	3	0,22	0,9	150	3	559	60		0,42	
		100 €/kg	2	9	0,56	9,1	229	3	0,05	3,5	164	2	573	61		1,01	
		600 €/kg	2	19	0,24	10,0	229	3	0,02	10,0	112	2	521	57		2,13	
Scénarios hausse de 100% prix du carburant (fin 2006)	50 tonnes	10 €/kg	12	12	2,26	1,6	229	3	0,23	0,8	139	3	547	59	-2	0,47	11
		100 €/kg	3	11	0,56	7,3	229	3	0,05	3,5	147	2	556	60	-2	1,11	9
		600 €/kg	2	21	0,22	10,0	229	3	0,02	10,0	106	2	515	56	-1	2,27	7
Scénarios référence (prix carburant fin 2006)	500 tonnes	10 €/kg	4	10	9,14	4,7	229	4	0,92	2,1	150	3	559	52		0,18	
		100 €/kg	2	11	3,95	10,0	229	4	0,22	8,8	144	3	553	51		0,45	
		600 €/kg	2	19	2,39	10,0	229	3	0,19	10,0	112	3	521	57		1,03	
Scénarios hausse de 100% prix du carburant (fin 2006)	500 tonnes	10 €/kg	5	12	9,63	3,8	229	4	0,98	2,0	139	3	547	51	-2	0,20	13
		100 €/kg	2	12	3,65	10,0	229	4	0,23	8,3	139	3	547	51	-1	0,50	9
		600 €/kg	2	21	2,15	10,0	229	3	0,19	10,0	106	3	515	56	-1	1,09	5
Scénarios référence (prix carburant fin 2006)	5 000 tonnes	1 €/kg	4	38	25,0	4,7	229	5	14,03	1,4	79	4	367	32		0,04	
		10 €/kg	2	14	25,0	12,7	229	5	3,71	5,1	129	4	418	36		0,08	
		100 €/kg	2	9	25,0	20,0	229	5	1,90	10,0	162	3	451	47		0,17	
Scénarios hausse de 100% prix du carburant (fin 2006)	5 000 tonnes	1 €/kg	5	48	25,0	3,7	229	5	14,90	1,3	70	4	359	31	-3	0,05	19
		10 €/kg	2	17	25,0	10,3	229	5	3,95	4,8	116	4	405	35	-3	0,09	15
		100 €/kg	2	21	21,5	10,0	229	5	1,90	10,0	106	3	395	43	-10	0,22	25

Tableau 5 : Première série de simulations, tableau synthétique des résultats pour les réseaux dédiés aux *grands* clients

### **Réseaux de distribution mixtes et envois mutualisés**

Il nous semblait important de pouvoir également simuler des réseaux dédiés aux deux types de clients, notamment parce qu'il est vraisemblable et réaliste que des petits clients puissent bénéficier de gains sur leurs coûts de distribution, grâce à une mutualisation des envois avec des quantités destinées à d'autres clients (et s'agissant éventuellement d'autres produits). Les résultats présentés sur les deux pages successives suivantes nous indiquent :

- qu'effectivement les petits clients peuvent réaliser des gains importants sur la massification des envois en amont du réseau : cela leur permet de réduire leurs coûts de distribution même si nous pouvons observer qu'ils restent toujours plus élevés que ceux des grands clients ;
- dans le même temps, et pour cette même raison, leurs expéditions sont le plus souvent plus émettrices de GES que celles destinées aux grands clients (résultat apparemment paradoxal compte tenu des simulations qui séparaient ces deux types de clients).

Pour le moins nous pouvons constater, ce résultat ne nous paraissait pas évident, que la hausse des prix du carburant (certes forte) agit non seulement sur le poids des envois (en augmentant leur poids et en réduisant de fait leur fréquence), mais aussi sur les distances (avec dans certains cas des sites de distribution intermédiaires plus nombreux), ou en d'autres termes sur la structure même des réseaux de distribution. Dans le même temps, sur certains produits, la hausse du coût de distribution qui en résulte est assez élevée, alors que ces simulations ne sont pas probantes quant à la réduction des émissions de GES.

Enfin, il faut préciser que la typologie transport utilisée a des effets importants sur l'évaluation des émissions de GES. Il pourrait être utile, dans un travail ultérieur, de la comparer aux résultats de l'enquête ECHO de 2004, et de vérifier sur cette base s'il serait judicieux de *l'affiner*. L'enquête ECHO peut, en effet, nous informer sur le nombre de trajets, la distance réelle des trajets et le type de véhicule utilisé pour chacun de ces trajets, notamment en fonction du poids de l'envoi.

(0)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)
(Type de simulation effectué) l'organisation logistique résulte de la recherche de l'optimum du coût de distribution pour le chargeur	Quantité mensuelle expédiée par la firme (paramètre 1 simulations)	Valeur H.T. au kg du produit (paramètre 2 simulations)	Livraison directe "Grands clients" (oui:1; non:0)	Structure 3 niveaux "Petits clients" (oui:1; non:0)	Nombre centres distribu- tion C1 (centres intermédi- aires)	Poids envoi T1 (tonnes)	Fréquence envoi F1	D1 (km) Distance orthodro- mique	Type Transport envoi T1 (2: messagerie; 3: réseau; 4:lot; 5:complet)	Poids envoi Tb (tonnes)	Fréquence envoi Fb	Db (km) Distance orthodrom- ique	Type Transport Envoi Tb (2: messagerie; 3: réseau; 4:lot)	Poids envoi T2s (tonnes)	Poids envoi Ts (tonnes)	Ds (km) Distance orthodromiq- ue	Type Transport Envoi Ts (2: messagerie; 0: tournées de distribution)
Scénarios référence (prix carburant fin 2006)	500 tonnes	1 €/kg	0	1	15	25	1	229	5	3	0,5	128	4	5,0	0,06	64	0
		10 €/kg	0	1	11	9	5	229	4	1	2,0	148	3	1,5	0,06	74	0
		100 €/kg	0	0	12	4	10	229	4	0	8,5	142	3	0,0	0,06	142	2
		600 €/kg	0	0	20	2	10	229	3	0	10,0	109	3	0,0	0,06	109	2
Scénarios hausse de 100% prix du carburant (fin 2006)	500 tonnes	1 €/kg	0	0	18	25	1	229	5	4	0,5	115	4	0,0	0,06	115	2
		10 €/kg	0	1	13	9	4	229	4	1	1,9	136	3	1,4	0,06	68	0
		100 €/kg	0	0	13	4	10	229	4	0	8,1	136	3	0,0	0,06	136	2
		600 €/kg	0	0	22	2	10	229	3	0	10,0	104	3	0,0	0,06	104	2
Scénarios référence (prix carburant fin 2006)	5 000 tonnes	1 €/kg	0	0	39	25	5	229	5	13	1,3	78	4	0,0	0,58	78	3
		10 €/kg	0	0	15	25	12	229	5	3	5,0	128	4	0,0	0,58	128	3
		100 €/kg	0	0	9	25	20	229	5	2	10,0	162	3	0,0	0,58	162	3
Scénarios hausse de 100% prix du carburant (fin 2006)	5 000 tonnes	1 €/kg	0	0	49	25	4	229	5	14	1,2	69	4	0,0	0,58	69	3
		10 €/kg	0	0	18	25	10	229	5	4	4,7	115	4	0,0	0,58	115	3
		100 €/kg	0	0	22	20	10	229	5	2	10,0	104	3	0,0	0,58	104	3
Scénarios référence (prix carburant fin 2006)	50 000 tonnes	1 €/kg	1	0	-	-	-	-	-	25	6,9	229	5	0,0	-	-	-
		10 €/kg	0	0	90	25	20	229	5	17	10,0	51	4	0,0	5,76	51	4
Scénarios hausse de 100% prix du carburant (fin 2006)	50 000 tonnes	1 €/kg	1	0	-	-	-	-	-	25	6,9	229	5	0,0	-	-	-
		10 €/kg	0	0	90	25	20	229	5	17	10,0	51	4	0,0	5,76	51	4

Tableau 6 : Première série de simulations, tableau synthétique des résultats pour les réseaux dits *mixtes* (tous types de clients)

(0)	(1)	(2)	(18)	(19)	(20)	(21)	(22)	(23)	(24)	(25)	(26)	(27)	(28)	(29)	(30)
(Type de simulation effectué) l'organisation logistique résulte de la recherche de l'optimum du coût de distribution pour le chargeur	Quantité mensuelle expédiée par la firme (paramètre 1 simulations)	Valeur H.T. au kg du produit (paramètre 2 simulations)	Stocks "Grands clients" (en nombre de jours dans le réseau)	Stocks "Petits clients" (en nombre de jours dans le réseau)	Distance totale réelle parcourue "Grands clients" (km route)	Distance totale réelle parcourue "Petits clients" (km route)	Emissions kg CO2-e/ tonne produit envoi T1	Emissions kg CO2-e/ tonne produit envoi Tb	Emissions kg CO2-e/ tonne produit envoi Ts	Emissions kg CO2-e / tonne produit - "Grands clients"	Emissions kg CO2-e / tonne produit - "Petits clients"	Emissions kg CO2-e / tonne produit - moyenne tous clients	var en % Emissions CO2-e par rapport au scenario de référence	Coût de distribution par produit "Grands clients"	Coût de distribution par produit "Petits clients"
Scénarios référence (prix carburant fin 2006)	500 tonnes	1 €/kg	15	64	417	480	8957	5881	1288	13047	4550	39		0,08	0,58
		10 €/kg	4	15	556	630	11306	9460	1487	18505	6114	55		0,18	0,70
		100 €/kg	2	2	550	550	11306	9270	2318	18315	4579	51		0,47	0,80
		600 €/kg	2	2	518	518	15004	8259	2065	20263	5066	56		1,05	1,33
Scénarios hausse de 100% prix du carburant (fin 2006)	500 tonnes	1 €/kg	18	18	404	404	8957	5477	2109	12642	3900	37	-6	0,09	0,67
		10 €/kg	5	18	545	613	11306	9096	1370	18141	5906	53	-2	0,21	0,76
		100 €/kg	2	2	545	545	11306	9101	2275	18146	4536	50	-1	0,51	0,88
		600 €/kg	2	2	513	513	15004	8089	2022	20092	5023	56	-1	1,10	1,39
Scénarios référence (prix carburant fin 2006)	5 000 tonnes	1 €/kg	4	4	366	366	89571	43116	18176	114773	36090	34		0,04	0,15
		10 €/kg	2	2	417	417	89571	58811	22100	130468	40014	38		0,08	0,18
		100 €/kg	2	2	451	451	89571	99151	24788	170808	42702	47		0,18	0,26
Scénarios hausse de 100% prix du carburant (fin 2006)	5 000 tonnes	1 €/kg	5	5	358	358	89571	40499	17522	112156	35436	33	-2	0,05	0,16
		10 €/kg	2	2	404	404	89571	54766	21088	126423	39002	37	-3	0,09	0,20
		100 €/kg	2	2	393	393	89571	80871	20218	152528	38132	42	-11	0,22	0,30
Scénarios référence (prix carburant fin 2006)	50 000 tonnes	1 €/kg	2		229	-	-	-	-	-	-	25		-	-
		10 €/kg	2	2	340	340	895708	348415	87104	1064981	266245	30		0,04	0,06
Scénarios hausse de 100% prix du carburant (fin 2006)	50 000 tonnes	1 €/kg	2	-	229	-	-	-	-	-	-	25		-	-
		10 €/kg	2	2	340	340	895708	348417	87104	1064983	266246	30		0,05	0,06

Tableau 6 (suite) : Première série de simulations, tableau synthétique des résultats pour les réseaux dits *mixtes* (tous types de clients)

## **En conclusion : des mesures de rationnement carbone inefficaces sur les émissions de GES du transport de marchandises ?**

Suivant nos objectifs, nous avons donc testé au cours de cette première série de simulations une augmentation des tarifs routiers correspondant au scénario 2, qui avait été proposé dès le début du projet, c'est-à-dire le scénario intermédiaire proposant une augmentation de 100% du prix du carburant. Cette hausse a été calculée sur la base des tarifs de la fin de l'année 2006 (tarifs réels pratiqués du colis de quelques kilos au lot complet). Nous avons, rappelons-le, considéré que de tels scénarios de hausses des prix du transport devaient être envisagés à un horizon de 10 ans, et replacés dans la perspective d'une possible crise climatique.

	Taxe carbone	Prix du permis (tonne de CO2)	Prix du carburant routier	Prix du transport / t-km (estimation)
Scénario 2	0,81 €HT	310 €	+100%	+25%

**Tableau 7 : Scénario 2 rationnement carbone**

Ce scénario intermédiaire d'augmentation des prix du transport routier a été simulé en faisant varier simultanément des paramètres relatifs aux volumes émis par le chargeur, et à la valeur au kg du produit (ces valeurs permettant de caractériser des grands types de produit), comme explicité précédemment dans ce rapport (données retenues sur la base d'une analyse des résultats de l'enquête ECHO 2004).

Chaque simulation a ainsi permis de déterminer l'organisation logistique optimale du point de vue du chargeur, c'est-à-dire celle qui lui permet de minimiser la somme de ses coûts de distribution (coûts de transport et coûts liés aux stocks, c'est-à-dire à l'immobilisation des produits dans le réseau). Cette organisation logistique optimale, pour le chargeur, est déterminée par les simulations du modèle, et est caractérisée de deux manières :

- Premièrement, par une structure de distribution spécifique (soit le degré de centralisation/hierarchisation du réseau, et le nombre de centres de distribution à tous les niveaux du réseau) ; puisqu'il faut considérer dans les résultats de ces simulations qu'il s'agit d'une hausse du prix du carburant à un horizon de 10 ans, et que la réponse peut induire de fait une reconfiguration du système logistique entre ces deux dates. La structure de distribution a une incidence directe sur les

distances séparant les sites de distribution, leur nombre et donc aussi sur la possibilité de massifier les flux de transport.

- Deuxièmement, par le cadencement des envois à tous les niveaux du réseau (poids et fréquence des envois entre les sites) qui, de fait, va induire des organisations différentes s'agissant du transport routier (messagerie, par exemple, avec des opérations de collecte et de distribution, ou encore lot complet au moyen d'un ensemble tracteur/semi-remorque, organisations renvoyant à la *typologie* du transport routier introduite dans le modèle et explicitée précédemment).

La typologie transport de l'ADEME utilisée, reflétant les différentes organisations du transport routier, ainsi que la disposition des centres de distribution intermédiaires dans le réseau jouent ainsi un rôle prépondérant dans l'évaluation des émissions de GES.

De fait, à chaque simulation, correspond une configuration logistique optimale pour le chargeur qui n'induit pas les mêmes émissions de GES. Elles vont dépendre, notamment, des distances et du nombre de liaisons à l'intérieur du réseau de distribution, mais aussi du service de transport routier qui, lui-même, dépend du poids de l'envoi (messagerie, lot partiel, lot complet, etc.). Ces différents services de transport routier ont recours à des organisations différentes, c'est-à-dire que non seulement ils n'utilisent pas les mêmes types de véhicules (avec des émissions moyennes à la tonne-km différentes), mais de plus les distances totales réelles parcourues ne peuvent être les mêmes selon le service (le kilométrage est évidemment supérieur dans le cas du transport d'une palette unique par rapport au transport d'un lot complet ; dans le premier cas, il y aura nécessairement des opérations de collecte et de distribution en plus du transport principal entre les agences de l'opérateur, tandis que dans le second cas il y aura un transport direct avec un gros porteur ou un ensemble tracteur/semi-remorque).

Nous avons constaté, sur la base de cette première série de simulations, que la hausse des prix du carburant avait bien une incidence sur la structure des réseaux et sur les distances parcourues (même faible), en même temps que sur le cadencement des envois (poids et fréquence). Dans le même temps, sur certains produits, la hausse du coût de distribution qui en résultait était assez élevée. Cependant, cette hausse élevée des prix du transport routier conduit dans la plupart des cas à une réduction très modeste des émissions de GES (le plus souvent en moyenne de 1 à 3% sauf cas particuliers). Faut-il donc conclure à une quasi-inefficacité des politiques de rationnement carbone sur les organisations logistiques

du chargeur, c'est-à-dire sur leurs émissions de GES<sup>8</sup> ? Afin d'aller plus en avant sur cette question, nous allons explorer des simulations différentes dans une deuxième phase.

---

<sup>8</sup> En considérant toujours que nous ne traitons pas ici du *dernier km* (qui peut peser dans le bilan carbone global).



#### **4. Deuxième série de simulations : identification de gisements de réduction d'émissions de GES et évaluation du coût du carbone évité**

##### **Objectifs de cette seconde série de simulations et modifications apportées au modèle**

C'est donc sur la base des résultats de la première série de simulations, et sur la constatation d'organisations de distribution apparemment *inélastiques* du point de vue des émissions de GES à des hausses du prix du carburant même élevées (qui peuvent s'apparenter aussi à des prix considérés comme élevés d'une taxe carbone ou d'un permis d'émission négociable), qu'il a été décidé d'orienter la suite de nos travaux de la façon suivante :

- Premièrement, d'effectuer des simulations d'une nature différente, non plus centrées uniquement sur une recherche de l'optimum économique du point de vue du chargeur mais centrées, pour certaines d'entre elles, sur des réductions possibles des émissions de GES (recherche d'organisations qui réduisent voire minimisent les émissions) ; pour ce faire, le modèle a été modifié puisqu'il avait été construit de sorte à rechercher l'optimum des coûts de distribution et non pas à minimiser les émissions de GES sous certaines conditions.

En d'autres termes, le modèle a été modifié de sorte à déterminer les organisations logistiques qui permettent d'atteindre des réductions parfois significatives des émissions de GES (du point de vue de la structure des réseaux mais aussi du cadencement des envois). Ces modifications ont été assez radicales dans la mesure où le modèle avait été conçu et développé pour rechercher un optimum économique du point de vue du chargeur. C'est la raison pour laquelle, dans certains cas, nous avons *forcé* le modèle à rechercher des organisations qui, du point de vue des coûts de distribution, donnent des résultats parfois irréalistes mais nous indiquent en quelque sorte un point bas des émissions de GES, pour le mode routier notamment, par rapport à la situation économique optimale. Les diverses simulations réalisées nous ont non seulement permis d'identifier où se situent les gisements de réduction des émissions de GES (ou quels sont les facteurs à l'origine des organisations les moins *écologiques*), mais également d'évaluer ainsi le coût de la tonne de CO<sub>2</sub>-e évitée. En effet, la hausse des coûts de distribution qui résulte de ces simulations peut être ainsi comparée à la situation économique optimale du chargeur (simulations dites de *référence*), et de ce fait permet de *donner* un prix à la tonne de carbone *évitée* (si nous pouvons nous exprimer ainsi).

Ce prix pourra être comparé à des valeurs de référence issues du rapport Quinet (Centre d'Analyse Stratégique) qui indique une valeur « optimale » de 32 euros la tonne de CO<sub>2</sub>

aujourd'hui, 100 euros en 2030 et entre 150 et 350 euros en 2050. Donc, dans les scénarios, une valeur inférieure à 30 voire 100 euros est acceptable sur le plan économique : elle correspond à des niveaux de taxe envisageables et indique des pistes d'action intéressantes (i.e. efficaces sur le plan économique).

Ces simulations ont été réalisées en employant différentes méthodes qui seront explicitées en présentant les résultats.

- Deuxièmement, une *option fer* a été introduite dans le modèle, il s'agit en fait de proposer une alternative ferroviaire au mode routier sur tous les trajets routiers où les simulations indiquent qu'il y a massification (c'est-à-dire dès lors qu'il y a utilisation de tracteurs/semi-remorques sur des trajets qui ne relèvent pas de la collecte ou de la distribution), ou bien s'agissant tout simplement du transport d'un lot complet (supérieur ou égal à 18 tonnes ; voir à titre d'exemples les illustrations de la figure suivante). Sur cette base, une variable a été créée pour introduire, à la demande, des contraintes de distance minimale (allant de 200 à 500 km ; même si les contraintes minimales de distance paraissent à ce jour irréalistes, nous n'excluons pas la possibilité d'un service innovant dans le futur sur certains trajets).

Nous avons appelé le développement de ce module *Option fer*, et non module de choix modal, parce que le modèle propose systématiquement une alternative ferroviaire dès lors qu'il y a un trajet routier massifié, soit le transport d'un lot complet entre deux sites de distribution du chargeur, soit un transport entre deux agences de tri par exemple, s'agissant d'un envoi de type messagerie. Le modèle, rappelons-le, tient compte d'une typologie transport qui est fonction du poids de l'envoi. Mais surtout, ce module a été créé pour introduire les conditions les plus favorables au développement d'un service ferroviaire, et non pas sur la base du traitement de critères de choix modal telles que la fiabilité ou la ponctualité, critères qui, en l'état actuel, rendent irréaliste le choix modal pour nombre de produits. Nous sommes ainsi partis sur des conditions qui présupposent :

- Un mode ferroviaire fiable et ponctuel, c'est-à-dire une qualité de service de ce point de vue équivalente à celle de la route (nous nous plaçons résolument dans une perspective de développement de services innovants), et offrant des tarifs équivalents à ceux de la route.
- En revanche, nous avons tenu compte du fait que ce service ferroviaire pourrait entraîner un délai d'attente supplémentaire pour la marchandise (correspondant à un temps de transport plus long de porte à porte), de 24 à 48 heures par rapport à un service tout route ; ceci étant, encore une fois, ce critère de temps d'attente est sans rapport avec les critères énoncés précédemment, de fiabilité, de ponctualité ou

encore de sécurité, qui peuvent se révéler extrêmement discriminants selon le type de la marchandise. Pour évaluer ce temps d'attente, nous l'avons assimilé à un coût supplémentaire lié à l'immobilisation de la marchandise dans le réseau de distribution. De fait, sur la base de cette hypothèse, le coût supplémentaire résultant est directement lié à la valeur au kg du produit. Il dépend aussi des hypothèses retenues sur le taux d'intérêt à considérer pour le capital immobilisé, nous avons retenu arbitrairement le même taux pour tous les produits (voir notamment à ce sujet les valeurs données par A.K. Samii, 2000 et 2004). Ce taux varie en principe selon le secteur et l'entreprise, ou encore selon certaines caractéristiques du produit, ici pour nos simulations, il donne des valeurs directement, et uniquement, fonction de la valeur au kg du produit (ne s'agissant pas de cas d'application réels ici, mais de cas génériques). Mais il nous permet d'obtenir, comme nous le verrons plus loin, des résultats très cohérents avec la réalité.

Enfin, cette deuxième série de simulations a également été réalisée en faisant varier simultanément des paramètres relatifs aux volumes émis par le chargeur, et à la valeur au kg du produit (comme pour la première série de simulations, ces différentes plages de valeurs de paramètres ont été retenues dans le but de caractériser les grands types de produits, valeurs retenues en cohérence avec des travaux réalisés à partir des données des enquêtes Chargeur de 1988 et ECHO 2004). Au final, nous avons créé 90 nouvelles variables dans le modèle, et réalisé environ 150 simulations pour lesquelles nous avons extrait les résultats d'environ 35 variables. Nous avons essayé pour la présentation des résultats, dans la section suivante, d'être les plus synthétiques possible, en proposant néanmoins des résultats plus détaillés en annexe. La lecture de ces derniers permet notamment de comprendre à quel type de structure de distribution les scénarios nous permettent d'aboutir. Ils nous indiquent ainsi s'il s'agit de réseaux plus ou moins centralisés/hierarchisés, avec éventuellement des flux massifiés en amont des réseaux, ou à l'inverse s'il s'agit de flux plutôt éclatés, ou encore d'évaluer le taux de rotation des stocks, élément aujourd'hui essentiel d'un point de vue financier, et probablement l'un des principaux déterminants de la croissance des flux et des émissions de GES dans le transport de fret. Cette lecture permettra peut-être aussi de tirer d'autres conclusions et d'autres analyses que celles que nous proposons ici.

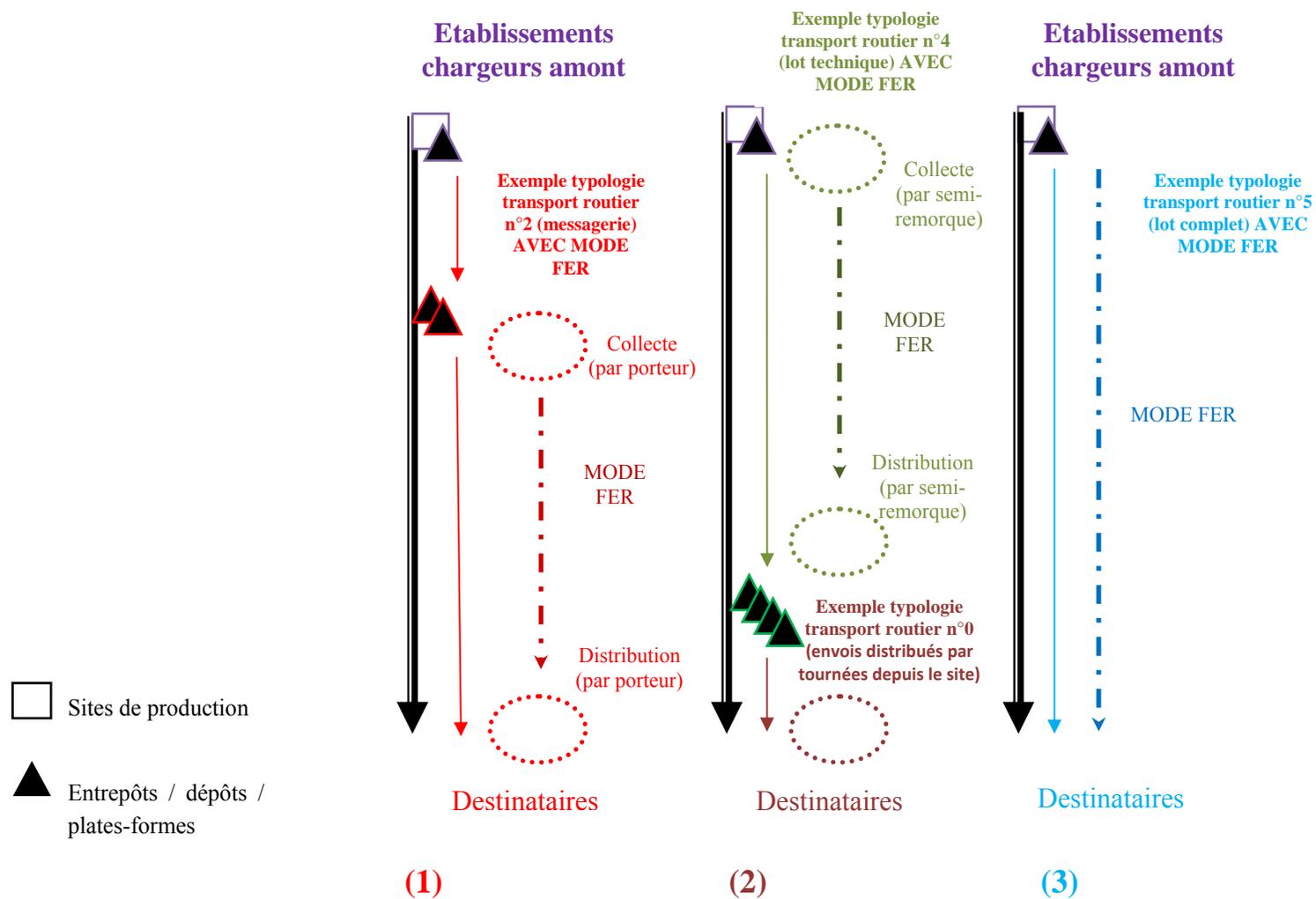


Figure 6 : schématisation de différentes structures de distribution et de l'organisation possible du transport entre chaque niveau avec le mode ferroviaire (exemples de configurations pouvant être simulées avec le modèle SANDOMA V4)

### **Autres caractéristiques de la deuxième série de simulations**

Dans cette deuxième série de simulations, nous avons décidé d'associer systématiquement des envois à destination de tous types de clients (dits *petits* et *grands*), c'est-à-dire correspondant à des volumes de commandes pouvant être extrêmement différents, et donc ne requérant pas *a priori* la même organisation logistique. La répartition des quantités entre les grands et petits clients dans ces simulations est restée fixée initialement à 80/20 (comme pour celles des réseaux dits *mixtes* de la phase 1).

Par ailleurs, dans les simulations précédentes, on effectuait des optimisations dans le but de minimiser la somme des coûts de distribution correspondant au réseau desservant les *grands* clients (en supposant que ces derniers ont les moyens d'influencer leurs fournisseurs en ce sens), même lorsqu'il s'agissait des réseaux dits *mixtes* (desservant donc petits et grands clients). Il a été décidé de modifier ce calcul, en recherchant le coût moyen de distribution optimum pour l'ensemble des clients, et en y incluant les coûts liés aux stocks sur les sites de distribution appartenant aux grands clients (qui peuvent être des grossistes, distributeurs, etc.). Cette modification a eu pour objectif d'assurer une parfaite cohérence entre les différents résultats, sachant que les calculs effectués par ailleurs sur les émissions moyennes CO<sub>2</sub>-e par tonne de produit portent sur tous les envois (petits et grands clients), depuis les sites amont jusqu'aux clients. De fait, certains résultats peuvent légèrement différer en valeur absolue dans cette série de simulations par rapport à la précédente, mais cela ne modifie en rien l'analyse des résultats qui avait été faite. En revanche, dans les résultats détaillés des simulations annexés à ce rapport, on pourra observer un taux de rotation des stocks (ou une immobilisation des produits en nombre de jours dans le réseau) nettement supérieure concernant les grands clients pour cette série de simulations, puisqu'en effet on y a inclus les stocks des clients eux-mêmes (ces résultats ne sont donc pas comparables avec la série précédente, ni avec ceux des *petits* clients).

### **Synthèse des résultats et analyses de la deuxième série de simulations**

Dans cette deuxième phase, nous allons expliciter les différentes simulations réalisées et présenter quelques résultats choisis dans des tableaux très synthétiques (les résultats détaillés figurent en annexe 3). Pour toute cette série de simulations, nous avons naturellement mis l'accent sur les émissions de GES par tonne de produit transportée dans le réseau de distribution, mais aussi sur les évaluations du coût de distribution qui résultent des différentes organisations logistiques. Le différentiel entre le coût de distribution optimum pour le chargeur, et les autres valeurs obtenues selon les différents scénarios, a permis de donner un coût à la tonne CO<sub>2</sub>-e évitée. Par ailleurs, lorsqu'il y a utilisation du

mode ferroviaire sur des trajets massifiés, à la place du mode routier, deux scénarios de temps d'immobilisation supplémentaire de la marchandise ont été retenus (24 ou 48 heures supplémentaires par rapport à la route). Ces temps d'immobilisation engendrent un coût ; les modalités retenues pour évaluer ce coût supplémentaire dans la distribution du produit ont été explicitées dans la section précédente, il est directement fonction de la valeur au kg du produit. Il permet là-aussi de proposer une évaluation du coût de la tonne CO<sub>2</sub>-e évitée grâce à l'utilisation du mode ferroviaire.

### ***Les scénarios de référence (mode routier uniquement)***

Les simulations suivantes correspondent aux scénarios de référence, c'est-à-dire à la recherche de l'organisation logistique qui conduira au coût de distribution moyen optimum<sup>9</sup> dans l'ensemble du réseau, en utilisant uniquement le mode routier, sur la base de tarifs établis à la fin de l'année 2006. Cette organisation logistique est, rappelons-le, définie :

- par sa structure (voir en illustrations les figures 4 et 5 précédentes), c'est-à-dire son degré de hiérarchisation/centralisation, et par le nombre de centres de distribution à chaque niveau ;
- par le cadencement de tous les envois (poids et fréquence) à l'intérieur du réseau ainsi défini.

Ces deux aspects, qui déterminent l'organisation logistique optimale du point de vue du chargeur, dépendent dans nos simulations de deux grands paramètres :

- les quantités totales expédiées par le chargeur (en amont du réseau) ;
- la valeur H.T. au kg du produit.

La configuration logistique, ainsi déterminée par les simulations, conduit à une évaluation des émissions de GES par tonne de produit transportée dans le réseau de distribution. Elles dépendent des distances à parcourir, du poids des envois et de l'organisation de transport correspondante, et doivent donc être calculées pour chaque *maillon* du réseau puis additionnées (voir la typologie transport retenue de l'ADEME et adaptée dans le modèle, ainsi que les figures 1 à 3 à titre d'illustrations ; les valeurs sont celles du Bilan Carbone® V6). Ces simulations nous serviront de référence pour toutes les simulations à suivre afin

---

<sup>9</sup> Comme nous l'avons expliqué plus haut, les modalités de ce calcul sont légèrement différentes dans cette deuxième série de simulations, les valeurs peuvent donc légèrement différer par rapport à la série précédente.

d'évaluer, selon les scénarios, la réduction en pourcentages des émissions de GES du transport qui pourrait en résulter, et éventuellement le surcoût logistique (le plus souvent ce différentiel de coût est donné en valeur absolue et en pourcentages dans les tableaux).

Comme nous l'avions déjà constaté avec la première série de simulations, et de manière un peu simplifiée, nous pouvons affirmer en regardant les chiffres du tableau 8 que plus les quantités sont importantes moins les émissions de GES sont élevées (grâce à des trajets massifiés). De même, plus la valeur au kg des produits est élevée, moins les organisations qui en résultent sont vertueuses du point de vue des émissions de GES, principalement en raison du cadencement des envois (qui permet de réduire le temps d'immobilisation des produits les plus chers dans le réseau).

(0)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
SCENARIO DE REFERENCE (MODE ROUTIER UNIQUEMENT)						
(Type de simulation effectué) l'organisation logistique résulte de :	Quantité mensuelle expédiée par la firme (paramètre 1 simulations)	Valeur H.T. au kg du produit (paramètre 2 simulations)	Emissions kg CO2-e / tonne produit (mode routier uniquement)	Coût de distrib moyen TOTAL par kg produit	Coût de distrib moyen TOTAL par tonne produit	Part en % du coût de distrib moyen sur val produit
la recherche de l'optimum du coût de distribution pour le chargeur (la version "tout route" i.e. sans "l'Option Rail" constitue le scénario de REFERENCE pour toutes les autres simulations)	50 000 tonnes	10 €/kg	30	0,056	56	0,6
		1 €/kg	25	0,037	37	3,7
	5 000 tonnes	100 €/kg	47	0,315	315	0,3
		10 €/kg	35	0,121	121	1,2
		1 €/kg	31	0,069	69	6,9
	500 tonnes	600 €/kg	56	1,825	1825	0,3
		100 €/kg	56	0,662	662	0,7
		10 €/kg	46	0,328	328	3,3
		1 €/kg	37	0,195	195	19,5
	50 tonnes	600 €/kg	56	3,136	3136	0,5
		100 €/kg	55	1,708	1708	1,7
		10 €/kg	53	0,951	951	9,5
1 €/kg		51	0,621	621	62,1	

**Tableau 8 : Deuxième série de simulations, valeurs des scénarios de référence (mode routier uniquement)**

### *Scénarios de référence (mode routier uniquement) et utilisation du mode ferroviaire*

Dans les deux tableaux suivants, nous proposons à côté des résultats du scénario de référence présenté ci-dessus, les résultats avec une utilisation du mode ferroviaire sur tous les trajets routiers où il y a massification (c'est-à-dire dès lors qu'il y a utilisation de tracteurs/semi-remorques sur des trajets qui ne relèvent pas de la collecte ou de la distribution, ou bien s'agissant tout simplement du transport d'un lot complet ; voir à titre d'illustrations la figure 6). Le premier tableau, ci-dessous, correspond à un service ferroviaire qui impliquerait un temps d'attente supplémentaire de 24h par rapport à un service *tout route* ; le second à un temps d'attente supplémentaire de 48h (valorisés, rappelons-le, comme des temps d'immobilisation supplémentaires des produits dans le réseau de distribution).

Nous devons faire une remarque importante sur la question de la distance minimale comme condition d'utilisation du mode ferroviaire. Ce projet ne proposait pas de réaliser des scénarios logistiques sur les aires de chalandise des unités de production ou des sites de distribution situés en amont des réseaux (il s'agit d'un autre travail, qui aurait multiplié ici considérablement le nombre des simulations, nous avons donc travaillé sur la base de distances moyennes telles qu'elles résultent des enquêtes chargeurs dès le démarrage du projet). En d'autres termes, pour la plus grande majorité de ces simulations, l'utilisation du mode ferroviaire sur des trajets massifiés nous imposait de travailler avec une condition de distance minimale d'un peu plus de 200 km (qui peut paraître au demeurant irréaliste ?). Ceci étant, pour atteindre une condition minimale par exemple de 400 km, les quelques essais effectués nous ont montré qu'il faudrait probablement multiplier par plus de 3 l'aire de chalandise initiale, il faudrait donc réaliser les mêmes simulations avec des aires de chalandise très élargies (qui ne correspondent plus aux distances moyennes constatées) ; mais ces quelques essais ont aussi indiqué que le potentiel de réduction des émissions de GES peut être encore plus important dans ces cas de figures (bien que nous ne puissions rien affirmer de plus, car il faudrait pour cela réaliser d'autres simulations). Cette constatation nous conduit à penser que la condition de la distance minimale pour l'utilisation du mode ferroviaire est peut-être la condition qui entrave véritablement l'utilisation du mode ferroviaire. Mais elle ne nous empêche pas ici d'évaluer le potentiel de réduction des émissions de GES que le mode ferroviaire pourrait impliquer (qui plus est sur des distances encore plus longues), et d'évaluer le coût de la tonne CO<sub>2</sub>-e ainsi évitée.

Nous pouvons ainsi remarquer, à la lecture des résultats du tableau suivant, que les réductions de GES sont substantielles, de 30 à 70% par rapport aux scénarios de référence

*tout route*, avec l'utilisation des valeurs moyennes fournies par l'ADEME, soit pour un train en France 0,010 kg CO<sub>2</sub>-e par tonne-km en moyenne (source : Bilan Carbone® V6). Nous devons rappeler néanmoins que les conditions présumées sont aussi favorables que possible pour le mode ferroviaire (service cadencé, fiable et ponctuel). Ces réductions importantes sont néanmoins permises parce que toutes ces organisations massifient au moins sur un trajet les flux en amont des réseaux (même pour les produits chers, puisque les organisations de transport, qu'il s'agisse de lots partiels ou même de messagerie ont des trajets de type tracteur/semi-remorque entre les agences ; cela se vérifie à la lecture des résultats détaillés en annexe 3). Dès lors, il est possible d'utiliser le mode ferroviaire en amont de ces réseaux. En analysant ces chiffres, on s'aperçoit aussi que les réductions les plus fortes en pourcentages sont obtenues avec les produits à faible valeur, et lorsque les quantités sont importantes. Précisément parce que ces deux critères sont les déterminants de la massification des flux, il s'agit donc d'organisations qui sont déjà vertueuses du point de vue des émissions de GES du transport, et le potentiel de réduction restant est l'utilisation du mode ferroviaire (en lieu et place du mode routier). Les autres organisations présenteront des flux nettement plus *éclatés* en aval du réseau, et de fait sont moins vertueuses.

Dans le même temps, les coûts engendrés par le temps d'attente supplémentaire du fret sont naturellement élevés s'agissant des produits les plus chers ; mais nous avons introduit aussi une évaluation de ce coût supplémentaire, en valeur absolue, pour relativiser ces chiffres par rapport à la valeur du produit. A titre d'exemple, dans le tableau 9, colonnes 10 et 11, on peut remarquer que l'augmentation de 16% du coût de distribution du produit à 600 euros du kg correspond à seulement 30 cents par kg de produit<sup>10</sup>. Le coût de la tonne CO<sub>2</sub>-e évitée n'en demeure pas moins extrêmement variable selon la valeur du produit, on pourra d'ailleurs remarquer que les valeurs les plus faibles correspondent aux quantités élevées et aux produits à faible valeur qui, *a priori*, sont déjà les utilisateurs privilégiés du mode ferroviaire. Ces résultats nous semblent de fait cohérents avec la réalité.

Le tableau 9 est instructif puisqu'il indique (en colonne 13) le coût d'évitement de la tonne de CO<sub>2</sub>. Dans ce tableau 9 les lignes d'intérêt sont celles indiquant un coût de 28 € par tonne de CO<sub>2</sub> évitée, ce qui est compatible avec les ordres de grandeur envisagés dans les travaux du CAS sur la valeur tutélaire du carbone (cf. supra).

En revanche, le tableau 10 (délai de 48h au lieu de 24h) implique un doublement des coûts de la tonne de CO<sub>2</sub> évitée : les changements envisagés dans la distribution sont donc inefficaces au plan économique.

---

<sup>10</sup> Ce coût serait, dans la réalité, réévalué à la hausse car les stocks de sécurité devraient probablement être aussi revus à la hausse afin de garantir le même niveau de service clientèle ; une telle évaluation sort néanmoins de notre sujet.

(0)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
			SCENARIO DE REFERENCE (MODE ROUTIER UNIQUEMENT)				SCENARIO DE REFERENCE mode route + mode FER (avec temps d'attente supp. fret 24h)						
(Type de simulation effectué) l'organisation logistique résulte de :	Quantité mensuelle expédiée par la firme (paramètre 1 simulations)	Valeur H.T. au kg du produit (paramètre 2 simulations)	Emissions kg CO2-e / tonne produit (mode routier uniquement)	Coût de distrib moyen TOTAL par kg produit	Coût de distrib moyen TOTAL par tonne produit	Part en % du coût de distrib moyen sur val produit	Emissions kg CO2-e / tonne produit avec "Option rail"	var en % Emissions CO2-e par rapport au scénario de référence avec "Option rail"	Coût additionnel en euros par tonne produit si "Option rail" (+24h temps attente)	Variation en euros du coût de distribution par kg de produit par rapport au scénario de référence avec "Option rail" (+24h)	var en % du coût de distrib moyen par rapport au scénario de référence avec "Option rail" (+24h)	Coût Kg CO2-e évité avec "Option rail" (+24h)	Coût tonne CO2-e évitée avec "Option rail" (+24h)
la recherche de l'optimum du coût de distribution pour le chargeur (la version "tout route" i.e. sans "l'Option Rail" constitue le scénario de REFERENCE pour toutes les autres simulations)	50 000 tonnes	10 €/kg	30	0,056	56	0,6	12	-60	5,0	0,0050	8,80	0,3	282
		1 €/kg	25	0,037	37	3,7	7	-71	0,5	0,0005	1,35	0,03	28
	5 000 tonnes	100 €/kg	47	0,315	315	0,3	30	-37	49,6	0,0496	15,76	2,8	2 818
		10 €/kg	35	0,121	121	1,2	18	-50	5,0	0,0050	4,10	0,3	282
	500 tonnes	1 €/kg	31	0,069	69	6,9	14	-56	0,5	0,0005	0,72	0,03	28
		600 €/kg	56	1,825	1825	0,3	38	-32	297,8	0,2978	16,32	17	16 906
		100 €/kg	56	0,662	662	0,7	38	-32	49,6	0,0496	7,50	2,8	2 818
		10 €/kg	46	0,328	328	3,3	29	-38	5,0	0,0050	1,51	0,28	282
	50 tonnes	1 €/kg	37	0,195	195	19,5	20	-47	0,5	0,0005	0,25	0,03	28
		600 €/kg	56	3,136	3136	0,5	38	-32	297,8	0,2978	9,50	17	16 906
		100 €/kg	55	1,708	1708	1,7	38	-32	49,6	0,0496	2,91	2,8	2 818
		10 €/kg	53	0,951	951	9,5	35	-33	5,0	0,0050	0,52	0,28	282
		1 €/kg	51	0,621	621	62,1	33	-35	0,5	0,0005	0,08	0,03	28

Tableau 9 : Scénarios de référence (mode routier uniquement), et scénarios de référence avec utilisation du mode ferroviaire (temps d'attente supplémentaire pour le fret de 24h)

(0)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
			SCENARIO DE REFERENCE (MODE ROUTIER UNIQUEMENT)				SCENARIO DE REFERENCE mode route + mode FER (avec temps d'attente supp. fret 48h)						
(Type de simulation effectué) l'organisation logistique résulte de :	Quantité mensuelle expédiée par la firme (paramètre 1 simulations)	Valeur H.T. au kg du produit (paramètre 2 simulations)	Emissions kg CO2-e / tonne produit (mode routier uniquement)	Coût de distrib moyen TOTAL par kg produit	Coût de distrib moyen TOTAL par tonne produit	Part en % du coût de distrib moyen sur val produit	Emissions kg CO2-e / tonne produit avec "Option rail"	var en % Emissions CO2-e par rapport au scénario de référence avec "Option rail"	Coût additionnel en euros par tonne produit si "Option rail" (+48h temps attente)	Variation en euros du coût de distribution par kg de produit par rapport au scénario de référence avec "Option rail" (+48h)	var en % du coût de distrib moyen par rapport au scénario de référence avec "Option rail" (+48h)	Coût Kg CO2-e évité avec "Option rail" (+48h)	Coût Tonne CO2-e évitée avec "Option rail" (+48h)
la recherche de l'optimum du coût de distribution pour le chargeur (la version "tout route" i.e. sans "l'Option Rail" constitue le scénario de REFERENCE pour toutes les autres simulations)	50 000 tonnes	10 €/kg	30	0,056	56	0,6	12	-60	9,9	0,01	17,60	0,56	564
		1 €/kg	25	0,037	37	3,7	7	-71	1,0	0,00	2,70	0,06	56
	5 000 tonnes	100 €/kg	47	0,315	315	0,3	30	-37	99,3	0,10	31,51	5,64	5 635
		10 €/kg	35	0,121	121	1,2	18	-50	9,9	0,01	8,19	0,56	564
	500 tonnes	1 €/kg	31	0,069	69	6,9	14	-56	1,0	0,00	1,43	0,06	56
		600 €/kg	56	1,825	1825	0,3	38	-32	595,7	0,60	32,63	33,81	33 812
		100 €/kg	56	0,662	662	0,7	38	-32	99,3	0,10	14,99	5,64	5 635
		10 €/kg	46	0,328	328	3,3	29	-38	9,9	0,01	3,03	0,56	564
	50 tonnes	1 €/kg	37	0,195	195	19,5	20	-47	1,0	0,00	0,51	0,06	56
		600 €/kg	56	3,136	3136	0,5	38	-32	595,7	0,60	18,99	33,81	33 812
		100 €/kg	55	1,708	1708	1,7	38	-32	99,3	0,10	5,81	5,64	5 635
		10 €/kg	53	0,951	951	9,5	35	-33	9,9	0,01	1,04	0,56	564
		1 €/kg	51	0,621	621	62,1	33	-35	1,0	0,00	0,16	0,06	56

Tableau 10 : Scénarios de référence (mode routier uniquement), et scénarios de référence avec utilisation du mode ferroviaire (temps d'attente supplémentaire pour le fret de 48h)

### *Scénarios de doublement des prix du carburant et offre ferroviaire*

Dans les simulations suivantes, nous avons repris le même scénario d'augmentation des prix du carburant de 100%, présenté lors de la première série de simulations<sup>11</sup>, mais en introduisant la possibilité d'utiliser le mode ferroviaire sur tous les trajets massifiés (toujours selon les mêmes modalités exposées précédemment, mais en ne proposant qu'un seul délai d'attente supplémentaire de 24h). Il y a donc deux sortes de scénarios sur chacun des tableaux qui vont suivre, les premières colonnes correspondent à des résultats avec le mode routier exclusivement, et les dernières colonnes à des résultats qui tiennent compte d'une alternative ferroviaire sur certains trajets (pour le tableau 11, les colonnes 10 à 14).

La colonne 4 du tableau 11 nous donne ainsi les réductions des émissions de GES en pourcentages par rapport aux scénarios de référence (tableau 8), uniquement avec l'utilisation de services de transport routier ; réductions au demeurant très modestes (de l'ordre de 1 à 3%, nous l'avions déjà constaté dans la première série de simulations). Avec l'alternative ferroviaire, les réductions des émissions de GES sont là-encore importantes mais équivalentes aux simulations précédentes (tableaux 9 et 10), à la différence que le coût de la tonne CO<sub>2</sub>-e évitée est plus élevé dans ce cas-ci en raison de l'augmentation des prix de transport<sup>12</sup> (qui entraîne dans les arbitrages une augmentation du coût de distribution moyen, sans que cela ait pour autant un résultat significatif sur les émissions de GES).

---

<sup>11</sup> Avec néanmoins, dans cette deuxième série de simulations, quelques modifications sur mode de calcul de l'optimum précisées au début de cette partie du rapport.

<sup>12</sup> Nous avons considéré que les services ferroviaires adaptaient leurs tarifs sur ceux du mode routier.

(0)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)
(Type de simulation effectué) <b>l'organisation logistique résulte de :</b>	Quantité mensuelle expédiée par la firme (paramètre 1 simulations)	Valeur H.T. au kg du produit (paramètre 2 simulations)	Emissions kg CO2-e / tonne produit	var en % Emissions CO2-e par rapport au scénario de référence	Coût de distrib moyen TOTAL par tonne produit	Part en % du coût de distrib moyen sur val produit	Variation en euros du coût de distribution par kg de produit par rapport au scénario de référence	var en % du coût de distrib moyen par rapport au scénario de référence	Coût tonne CO2-e évitée	Emissions kg CO2-e / tonne produit avec "Option rail"	var en % Emissions CO2-e par rapport au scénario de référence avec "Option rail"	Variation en euros du coût de distribution par kg de produit par rapport au scénario de référence avec "Option rail" (+24h)	var en % du coût de distrib moyen par rapport au scénario de référence avec "Option rail" (+24h)	Coût tonne CO2-e évitée avec "Option rail" (+24h)
la recherche de l'optimum du coût de distribution pour le chargeur avec une AUGMENTATION de 100% des PRIX DU CARBURANT (par rapport au scénario de référence)	50 000 tonnes	10 €/kg	30	0	64	0,6	0,01	14	#DIV/0!	12	-60	0,01	23,05	738
		1 €/kg	25	0	44	4,4	0,01	21	#DIV/0!	7	-71	0,01	21,94	458
	5 000 tonnes	100 €/kg	47	-1	357	0,4	0,04	13	79 545	29	-38	0,09	29,20	5 069
		10 €/kg	34	-3	136	1,4	0,01	12	16 068	17	-53	0,02	16,20	1 060
	500 tonnes	1 €/kg	31	-1	79	7,9	0,01	14	20 852	13	-58	0,01	14,26	548
		600 €/kg	55	-1	1881	0,3	0,06	3	128 306	38	-32	0,35	19,36	19 579
		100 €/kg	55	-1	717	0,7	0,05	8	145 189	38	-32	0,10	15,76	5 800
		10 €/kg	45	-1	359	3,6	0,03	9	46 137	28	-40	0,04	10,82	1 941
	50 tonnes	1 €/kg	37	-1	212	21,2	0,02	9	38 596	19	-48	0,02	8,76	947
		600 €/kg	55	-1	3286	0,5	0,15	5	349 865	38	-32	0,45	14,26	24 784
		100 €/kg	54	-1	1814	1,8	0,11	6	149 104	37	-33	0,16	9,14	8 514
		10 €/kg	52	-1	1005	10,0	0,05	6	116 420	35	-34	0,06	6,23	3 276
	1 €/kg	51	-1	646	64,6	0,02	4	82 204	33	-35	0,03	4,07	1 409	

Tableau 11 : Scénarios de doublement des prix du carburant, *tout route* et avec le mode ferroviaire

### *Scénarios extrêmes de réduction des émissions de GES*

Les scénarios qui sont présentés dans le tableau suivant sont très spécifiques. Ils ont consisté à rechercher les organisations logistiques qui permettraient d'approcher les émissions minimales de GES du transport de fret, d'abord avec le mode routier uniquement, puis en utilisant le mode ferroviaire sur les trajets massifiés. Pour cela, le modèle a cherché la structure de distribution qui permettait d'approcher les émissions de GES minimales en fonction des quantités émises par le chargeur. D'autre part, nous avons introduit un taux d'intérêt du coût du capital immobilisé proche de zéro, forçant ainsi le modèle à réduire drastiquement le cadencement de tous les envois. Le modèle a calculé simultanément le coût réel de distribution qui en résulterait, coût qui présente pour un certain nombre de ces simulations un caractère irréaliste et extrême (raison pour laquelle ces valeurs ont été imprimées en italique).

En dehors du fait que ces valeurs nous donnent en quelque sorte un point bas des émissions de GES du transport, il est intéressant d'observer au moins deux éléments dans ce tableau. Premièrement, les produits ayant la plus faible valeur (1 euros du kg<sup>13</sup>) donnent des résultats qui ne paraissent pas complètement irréalistes, car précisément ce sont les produits les moins chers à stocker, et le poids de ces envois est effectivement généralement élevé, avec des flux de transport massifiés. Le taux d'intérêt proche de zéro a donc principalement eu des effets sur les produits ayant des valeurs élevées, qui habituellement sont stockés le moins longtemps possible dans le réseau.

Deuxièmement, dans ces cas de figure extrêmes, nous pouvons observer que les *grands* clients sont ceux qui ont le plus à perdre, en d'autres termes l'augmentation du coût de distribution est plus élevée pour eux qu'elle ne l'est en moyenne sur l'ensemble du réseau. En effet, de telles organisations conduisent à un cadencement des envois, encore une fois irréaliste pour les produits chers (pour s'en persuader il suffit de s'en référer aux résultats détaillés en annexe 3), c'est-à-dire très faible et qui de fait réduit de manière extrême la rotation des stocks (alors même que cette capacité à massifier les volumes confère en principe un avantage financier essentiel à la grande distribution par exemple).

---

<sup>13</sup> Il s'agit, à titre d'exemple, du coût de production moyen du kg de pomme en France en 2009.

(0)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)
<b>(Type de simulation effectué) l'organisation logistique résulte de :</b>	Quantité mensuelle expédiée par la firme (paramètre 1 simulations)	Valeur H.T. au kg du produit (paramètre 2 simulations)	Emissions kg CO2-e / tonne produit	var en % Emissions CO2-e par rapport au scénario de référence	Coût de distrib moyen TOTAL par tonne produit	Part en % du coût de distrib moyen sur val produit	Variation en euros du coût de distribution par kg de produit par rapport au scénario de référence	var en % du coût de distrib moyen par rapport au scénario de référence	var en % du coût de distrib plateforme Grand Client par rapport au scénario de référence	Coût tonne CO2-e évitée	Emissions kg CO2-e / tonne produit avec "Option rail"	var en % Emissions CO2-e par rapport au scénario de référence avec "Option rail"	var en % du coût de distrib moyen par rapport au scénario de référence avec "Option rail" (+24h)	Coût tonne CO2-e évitée avec "Option rail" (+24h)
la recherche de la STRUCTURE de distribution qui minimise les émissions de GES; avec un CADENCEMENT des envois réduit artificiellement à l'extrême (scénarios PEU REALISTES qui indiquent en quelque sorte un point bas des émissions de GES)	50 000 tonnes	10 €/kg	25	-16	60	0,6	0,004	7	12	813	7	-76	16	395
		1 €/kg	25	0	37	3,7	0,000	0,00	0,00	#DIV/0!	7	-71	1	28
	5 000 tonnes	100 €/kg	26	-44	2324	2,3	2,01	638	831	95 702	9	-81	654	53 325
		10 €/kg	26	-25	278	2,8	0,16	130	202	17 797	9	-75	134	6 128
	500 tonnes	1 €/kg	26	-15	74	7,4	0,004	6	16	885	9	-72	7	211
		600 €/kg	31	-45	55022	9,2	53,20	2914	3385	2 136 978	13	-77	2931	1 258 396
		100 €/kg	26	-53	22026	22,0	21,36	3227	4724	730 318	9	-84	3234	456 878
		10 €/kg	26	-43	2371	23,7	2,04	623	1139	103 783	9	-81	624	54 903
	50 tonnes	1 €/kg	26	-29	344	34,4	0,15	76	228	13 624	9	-76	76	5 225
		600 €/kg	42	-24	131727	22,0	128,59	4100	4703	9 789 031	25	-55	4110	4 191 106
		100 €/kg	32	-42	63719	63,7	62,01	3630	4962	2 661 718	14	-74	3633	1 516 854
		10 €/kg	26	-50	22300	223,0	21,35	2246	5074	807 001	9	-83	2246	484 530
		1 €/kg	26	-48	2644	264,4	2,02	326	1254	82 263	9	-83	326	47 945

Tableau 12 : Scénarios extrêmes de réduction des émissions de GES, tout route et avec le mode ferroviaire

### ***Scénarios de recherche de la structure de distribution qui minimise les émissions de GES***

Dans les simulations du tableau suivant, suivant nos objectifs de cette deuxième phase, nous avons proposé un scénario dans lequel le modèle recherche la structure de distribution qui minimise les émissions de GES du transport de fret (degré de centralisation/hierarchisation du réseau et nombre de centres à chaque niveau). Mais, contrairement aux simulations précédentes qui conduisaient à des résultats pour certains irréalistes, il s'agit bien de la taille optimale de l'envoi, pour le chargeur, qui est calculée à tous les niveaux du réseau. En d'autres termes, la structure de distribution ne correspond pas nécessairement à celle qui conduit au coût de distribution optimum pour le chargeur sur l'ensemble du réseau. En revanche, le cadencement est bien issu du calcul de l'optimum entre coûts de transport et coûts intrinsèques des stocks à l'intérieur du réseau pour le chargeur (poids et fréquence des envois, et donc niveaux des stocks dans les différents sites de distribution). En fait, ces simulations présentent un intérêt particulier lorsqu'elles sont comparées aux résultats des simulations qui suivent (tableau 14), nous nous en expliquerons plus loin.

Il est néanmoins intéressant déjà de constater, avec les résultats du tableau 13, que dans certains cas les émissions de GES peuvent être réduites, y compris s'agissant du mode *tout route*, sans que cela n'augmente pour autant de manière drastique les coûts de distribution. Cette modification de la structure de distribution du chargeur se révèle ainsi plus efficace qu'une incitation économique telle que celle correspondant à une augmentation de 100% des prix du carburant. Le coût de la tonne de CO<sub>2</sub>-e qui peut être ainsi évité se situe dans plusieurs cas à des niveaux compatibles avec ce qui peut être envisagé dans le cadre d'une taxe (30, 40 ou 60€ par tonne de CO<sub>2</sub>). Cela concerne encore une fois les produits de faible valeur (1€ / kg).

(0)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)
(Type de simulation effectué) l'organisation logistique résulte de :	Quantité mensuelle expédiée par la firme (paramètre 1 simulations)	Valeur H.T. au kg du produit (paramètre 2 simulations)	Emissions kg CO2-e / tonne produit	var en % Emissions CO2-e par rapport au scénario de référence	Coût de distrib moyen TOTAL par tonne produit	Part en % du coût de distrib moyen sur val produit	Variation en euros du coût de distribution par kg de produit par rapport au scénario de référence	var en % du coût de distrib moyen par rapport au scénario de référence	var en % du coût de distrib plateforme Grand Client par rapport au scénario de référence	Coût tonne CO2-e évitée	Emissions kg CO2-e / tonne produit avec "Option rail"	var en % Emissions CO2-e par rapport au scénario de référence avec "Option rail"	Variation en euros du coût de distribution par kg de produit par rapport au scénario de référence avec "Option rail" (+24h)	var en % du coût de distrib moyen par rapport au scénario de référence avec "Option rail" (+24h)	Coût tonne CO2-e évitée avec "Option rail" (+24h)
la recherche de la STRUCTURE de distribution qui minimise les émissions de GES; en laissant le modèle calculer le cadencement des envois optimum pour le chargeur	50 000 tonnes	10 €/kg	29	-2	57	0,6	0,001	1	-1	1 304	11	-62	0,01	10,18	315
		1 €/kg	25	0	37	3,7	0,000	0	0	#DIV/0!	7	-71	0,00	1,35	28
	5 000 tonnes	100 €/kg	42	-12	339	0,3	0,02	8	-6	4 232	24	-49	0,07	23,34	3 161
		10 €/kg	33	-6	123	1,2	0,002	2	-5	902	15	-56	0,01	5,72	350
	500 tonnes	1 €/kg	31	-2	70	7,0	0,000	0	-2	403	13	-58	0,00	1,06	40
		600 €/kg	51	-9	1921	0,3	0,10	5	-4	19 496	33	-41	0,39	21,57	17 471
		100 €/kg	51	-9	741	0,7	0,08	12	-12	15 598	33	-41	0,13	19,43	5 671
	50 tonnes	10 €/kg	43	-6	340	3,4	0,01	4	-7	4 034	26	-45	0,02	5,11	816
		1 €/kg	33	-11	196	19,6	0,001	0	3	180	15	-59	0,00	0,65	58
		600 €/kg	51	-9	3507	0,6	0,37	12	-11	75 427	33	-41	0,67	21,32	29 677
		100 €/kg	51	-8	1865	1,9	0,16	9	-11	34 742	33	-40	0,21	12,09	9 329
	50 tonnes	10 €/kg	51	-4	980	9,8	0,03	3	-6	13 156	33	-38	0,03	3,66	1 749
1 €/kg		43	-15	622	62,2	0,001	0	1	76	26	-50	0,00	0,18	43	

Tableau 13 : Scénarios de recherche de la structure de distribution qui minimise les émissions de GES, *tout route* et avec le mode ferroviaire

### ***Scénarios de recherche de la structure de distribution qui minimise les émissions de GES et doublement de la taille optimale de tous les envois***

Ces simulations consistent, comme pour les précédentes, à rechercher la structure de distribution qui peut minimiser les émissions de GES, en fonction des paramètres de quantités et de valeur au kg du produit. Mais, dans le même temps, le modèle est *forcé* à doubler le poids optimal de tous les envois du réseau (il existe un scénario où ce poids est même triplé, les résultats figurent en annexe 3, mais ces résultats n'ont apporté rien de plus).

Avec ce scénario, nous pouvons constater immédiatement que les réductions de GES sont nettement plus importantes qu'avec la seule recherche de la structure de distribution optimale, et surtout concernent aussi (et *enfin* pourrait-on dire) les produits les plus chers. Ce sont ces derniers qui, en raison de leur coût au kg, se révèlent être effectivement les plus consommateurs de transport, en raison du cadencement élevé de leurs envois, et sont précisément pour cette raison les plus émetteurs de GES. Mais ce sont aussi ceux qui sont les moins sensibles aux politiques de rationnement carbone, car les coûts liés au transport ont un poids bien faible en comparaison des coûts liés aux stocks pour ces produits.

De ce doublement de la taille optimale de tous les envois, certes un peu brutale, résultent des augmentations des coûts de distribution, mais qui ne sont pas aussi irréalistes qu'il y paraît car elle touche les produits à forte valeur. En effet, même si l'augmentation s'avère très élevée en pourcentages (jusqu'à 60%), rapportée à la valeur au kg du produit, elle reste en quelque sorte *raisonnable*. A l'évidence les émissions de GES du mode routier les plus importantes proviennent du cadencement élevé des envois des produits à forte valeur. L'évolution de la demande des consommateurs en ce sens a joué, et continue de jouer, un rôle important dans toutes les tendances logistiques récentes, fortement consommatrices du transport routier, et émettrices de GES.

(0)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)
(Type de simulation effectué) l'organisation logistique résulte de :	Quantité mensuelle expédiée par la firme (paramètre 1 simulations)	Valeur H.T. au kg du produit (paramètre 2 simulations)	Emissions kg CO2-e / tonne produit	var en % Emissions CO2-e par rapport au scénario de référence	Coût de distrib moyen TOTAL par tonne produit	Part en % du coût de distrib moyen sur val produit	Variation en euros du coût de distribution par kg de produit par rapport au scénario de référence	var en % du coût de distrib moyen par rapport au scénario de référence	var en % du coût de distrib plateforme Grand Client par rapport au scénario de référence	Coût tonne CO2-e évitée	Emissions kg CO2-e / tonne produit avec "Option rail"	var en % Emissions CO2-e par rapport au scénario de référence avec "Option rail"	Variation en euros du coût de distribution par kg de produit par rapport au scénario de référence avec "Option rail" (+24h)	var en % du coût de distrib moyen par rapport au scénario de référence avec "Option rail" (+24h)	Coût tonne CO2-e évitée avec "Option rail" (+24h)
la recherche de la STRUCTURE de distribution qui minimise les émissions de GES; en forçant le modèle à doubler la taille optimale (économiquement pour le chargeur) de tous les envois (division par 2 du cadencement des envois optimum pour le chargeur)	50 000 tonnes	10 €/kg	25	-16	65	0,7	0,01	16	33	1 868	7	-76	0,01	24,60	620
		1 €/kg	25	0	35	3,5	0,000	0	0	#DIV/0!	7	-71	0,00	-2,33	0
	5 000 tonnes	100 €/kg	33	-31	509	0,5	0,19	62	46	13 185	15	-68	0,24	77,27	7 533
		10 €/kg	31	-13	151	1,5	0,03	24	3	6 375	13	-63	0,03	28,56	1 554
	500 tonnes	1 €/kg	26	-15	73	7,3	0,004	6	14	820	9	-72	0,00	6,34	197
		600 €/kg	46	-17	2885	0,5	1,06	58	67	114 332	29	-48	1,36	74,38	50 499
		100 €/kg	46	-17	758	0,8	0,10	14	13	10 134	29	-49	0,15	21,91	5 367
		10 €/kg	42	-8	391	3,9	0,06	19	5	17 062	25	-46	0,07	20,83	3 204
	50 tonnes	1 €/kg	31	-18	216	21,6	0,02	11	12	3 086	13	-65	0,02	10,88	873
		600 €/kg	51	-9	4195	0,7	1,06	34	18	215 243	33	-41	1,36	43,25	60 189
		100 €/kg	51	-8	2097	2,1	0,39	23	3	86 264	33	-40	0,44	25,70	19 838
	50 tonnes	10 €/kg	48	-10	1057	10,6	0,11	11	25	19 743	30	-44	0,11	11,75	4 851
1 €/kg		42	-17	664	66,4	0,04	7	15	5 011	25	-51	0,04	7,04	1 666	

**Tableau 14 : Scénarios de recherche de la structure de distribution qui minimise les émissions de GES, avec doublement de la taille optimale de tous les envois, *tout route* et avec le mode ferroviaire**



## Conclusion

Les enjeux de cette recherche étaient de mieux connaître la sensibilité de l'organisation logistique à des politiques de rationnement carbone dans le transport de marchandises, et la question posée était celle de l'évaluation des effets du rationnement carbone dans les décisions logistiques du chargeur (et donc le degré d'effectivité de ces politiques du point de vue des émissions du transport).

Les simulations ont démontré que la source principale des émissions de GES du transport de fret provient bien du cadencement élevé des envois. Ce dernier est fortement influencé par le coût au kg des produits car, pour immobiliser le moins longtemps possible un produit cher dans le réseau de distribution (et réduire ainsi les coûts financiers), il est effectivement indispensable d'accélérer la circulation des flux physiques.

Or, précisément, ces produits chers sont les moins sensibles aux politiques de rationnement carbone, car le poids des coûts de transport semble bien faible par rapport à celui des coûts liés aux stocks (qui est fonction du temps d'immobilisation des produits dans le réseau). Il semble donc bien qu'il y ait, de fait, une certaine *inélasticité* des organisations logistiques de distribution aux politiques de rationnement carbone.

En résumé, une hausse élevée du prix du transport (par la fiscalité carbone) modifie sensiblement la structure des réseaux de distribution, les distances parcourues et le cadencement des envois, mais conduit à une réduction très modeste des émissions de GES (de 1 à 3%).

Néanmoins, dans une deuxième série de simulations, nous avons montré qu'il était possible d'arriver à des organisations logistiques, en modifiant notamment la structure du réseau de distribution, qui réduisaient les émissions de GES, sans induire pour autant des surcoûts de distribution exorbitants. Mais il faut garder à l'esprit que ces configurations logistiques ne correspondent plus à l'organisation optimale pour le chargeur quant à ses coûts de distribution, et dépendent des quantités totales circulant dans le réseau et de la valeur au kg du produit. D'autres incitations, d'ordre stratégique pour les entreprises, comme celles qualifiées de *socialement responsables* pourraient avoir une incidence non négligeable dans la recherche de ce type d'organisation, à la condition qu'elles y soient suffisamment sensibilisées<sup>14</sup>.

Enfin, l'utilisation de services ferroviaires sur les trajets routiers massifiés engendrerait de fortes réductions des émissions de GES<sup>15</sup>. Pour ce faire, et proposer une réelle alternative à la route, il faudrait des services fiables et cadencés et sur des distances qui devraient être

---

<sup>14</sup> Il s'agit bien d'évolutions qui prennent place dans la stratégie des entreprises.

inférieures à 500 km. Ces services innovants, même en incluant des temps d'attente supplémentaires de l'ordre de 24h par rapport à un service *tout route*, ne sont pas à exclure car ils n'engendrent pas des surcoûts de distribution irréalistes (temps d'attente que nous avons valorisés comme des temps d'immobilisation supplémentaires de la marchandise dans le réseau ; de ce fait ils sont directement fonction de la valeur au kg du produit, et nous considérons qu'ils n'ont pas été sous-estimés).

L'évaluation du coût de la tonne de CO<sub>2</sub>-e évitée qui en résulte, et qui certes varie fortement selon les scénarios proposés, ainsi que les quantités et les caractéristiques du produit, reste souvent supérieure aux valeurs récentes avancées, dans le cadre d'une taxe carbone ou de permis négociables appliqués au transport de fret. Cependant, il existe plusieurs cas de réduction efficace des émissions (moins de 30€/tCO<sub>2</sub> voire moins de 100€) sur les produits de faible valeur (1€ / kg).

---

<sup>15</sup> sur la base des valeurs moyennes des émissions d'un train de fret en France, fournies par l'ADEME (source : Bilan Carbone® V6).

## Références bibliographiques

ADEME, 2004. *Bilan Carbone™ d'une activité industrielle ou tertiaire (V.2.2)*. [www.ademe.fr](http://www.ademe.fr). 223 p.

BAUMOL, W. and OATES, W., 1988. *The Theory of Environmental Policy*. Cambridge University Press, Cambridge.

BOISSIEU Christian de (sous la présidence de), 2006. Rapport du groupe de travail : *Division par quatre des émissions de gaz à effet de serre de la France à l'horizon 2050*. Paris : Ministère de l'Economie, Ministère de l'Ecologie. 77 p.

CITEPA, 2006. <http://www.citepa.org> (mai 2006).

ENERDATA, LEPII, 2005. *Etude pour une prospective énergétique concernant la France*. Rapport pour la DGEMP, Paris.

GACOGNE Valérie, 2003. *Impact des coûts de transport sur les systèmes logistiques par une modélisation en dynamique des systèmes – Le modèle SANDOMA*. Paris: ENPC, juin 2003. 262 p. Thèse pour le doctorat de transport.

GACOGNE Valérie (Complexio), 2008. *Projet TEOL : Analyse des dynamiques d'évolution du poids des envois sur la base des résultats de l'enquête ECHO et dans une perspective logistique par une modélisation en Dynamique des Systèmes*. Projet coordonné par l'INRETS-SPLOTT. 62 p.

GODARD, O., HENRY, C., 1998. *Les instruments des politiques internationales de l'environnement : la prévention du risque climatique et les mécanismes de permis négociables*, in Conseil d'Analyse Economique auprès du Premier Ministre. Fiscalité de l'environnement. Paris, La Documentation Française, Collection des Rapports du CAE, juillet, (pp. 83-174).

GUILBAULT Michèle, 2006. "Poids des envois". *Enquête ECHO – premiers résultats d'analyse*. INRETS : juin 2006, pp.25-46.

INRETS (ouvrage collectif), 2009. *Actes de la journée spéciale ECHO*. (Publication prévue fin 2009)

McKINNON Alan C., WOODBURN Allan, 1993. "A logistical perspective on the growth of lorry traffic". *Traffic Engineering + Control*, October 1996, Vol.34, n°10, pp.466-471.

McKINNON Alan C., WOODBURN Allan, 1996. "Logistical restructuring and road freight traffic growth - An empirical assessment". *Transportation*, 1996, n° 23, pp.141-161.

NEI (project co-ordinator), 1998. "Redefine Report". *Relationship between Demand for Freight-transport and Industrial Effects*. Bruxelles: DG VII, European Commission, 1998. 100 p. Poly. (rapport intermédiaire).

NEI (project co-ordinator), 1999. "Redefine Final Report". *Relationship between Demand for Freight-transport and Industrial Effects*. Bruxelles: DG VII, European Commission, February 1999. 18 p.

OECD, 2001. *Domestic Transferable Permits for Environmental Management. Design and Implementation*. Organisation for Economic Cooperation and Development, Paris.

RADANNE, P., 2004. *La division par 4 des émissions de dioxyde de carbone en France d'ici 2050*. Rapport de mission. Mission Interministérielle de l'Effet de Serre. Paris, 32 p.

RAUX, C., 2007. *Les permis négociables dans le secteur des transports*. La Documentation Française, 100 p.

RAUX, C., 2008. *How should transport emissions be reduced ? Potential for emission trading systems*. Discussion Paper No.2008-1. OECD, International Transport Forum, 42 p.

RIZET, C. & KEITA, B., 2005. *Chaînes logistiques et consommation d'énergie : Cas du yaourt et du jean*. INRETS-ADEME, Arcueil, 82 p.

RIZET, C. & al, 2009(?). *Supply chains, energy efficiency and greenhouse gas emissions: a comparison of apple supply chains in France, UK and Belgium*. 11 p. Poly.

SAMII Alexandre K., 2000. *Stratégies logistiques*. Paris: Dunod, 2000. 319 p.

SAMII Alexandre K., 2004. *Stratégies logistiques – Supply Chain Management*. Paris: Dunod, 2004. 389 p.

# **ANNEXES**



# ANNEXE 1 : L'organisation logistique : quels arbitrages pour les chargeurs ? Quel rôle pour la taille de l'envoi ?

**Valérie Gacogne**

Complexio  
10 bis, avenue des Gobelins  
75005 Paris

[valerie.gacogne@complexio.info](mailto:valerie.gacogne@complexio.info)

---

## L'organisation logistique et la notion d'arbitrage

### 1. Proposition de définitions de la logistique

#### 1.1. Une définition classique

Les définitions de la logistique sont nombreuses et le concept s'est considérablement développé au cours de la deuxième moitié du XX<sup>ème</sup> siècle. Elle est définie couramment comme l'aptitude à assurer la *disponibilité du bon produit, dans les bonnes quantités, au bon endroit, au bon moment, et au moindre coût*.

Si elle semblait confinée à des questions de distribution physique dans les années 60, la logistique a pris progressivement un rôle stratégique remarquable.

#### 1.2. La logistique : un système complexe de circulation des flux

La définition précédente de la logistique reste toujours valable mais nous proposerons aussi la définition suivante de la logistique (Gacogne, 2003, p.31), la considérant comme un système complexe de circulation des flux (A.K. Samii considère que le mot *flux* est aujourd'hui le mot clé de la logistique, 2000, p.8).

*L'organisation logistique vise à optimiser la circulation de l'ensemble des flux de matières, mais aussi d'information et financiers, depuis la production de matières premières jusqu'à la réception du produit fini par le consommateur final. Ces flux circulent d'amont en aval mais aussi d'aval en amont pour les flux de matières et d'information (notamment avec les opérations de recyclage pour les matières et la gestion des emballages telles les palettes, éléments de la logistique qui vont probablement être amenés à devenir stratégiques). Cette définition correspond à une conception à la fois beaucoup plus récente et large de la logistique, puisqu'elle tient compte de la circulation*

de l'ensemble des flux matériels et immatériels du système de production et de distribution.

## 2. Quels arbitrages pour les chargeurs ?

### 2.1. La notion d'arbitrage dans le système logistique

L'organisation du système logistique fait intervenir des décisions qui, pour certaines, peuvent être qualifiées de stratégiques, et ont une influence sur l'organisation des sites de production et les structures des réseaux de distribution. D'autres décisions sont plutôt d'ordre opérationnel, elles concernent la distribution physique des marchandises et les modes de gestion des stocks dans les sites de distribution ; elles influencent notamment le cadencement des envois. L'ensemble de ces décisions font intervenir des arbitrages entre coûts, liés à la production, au stockage et au transport, et au niveau de service souhaité (délai, fiabilité, flexibilité des livraisons par exemple).

Du point de vue du donneur d'ordre, qu'il s'agisse d'un industriel ou d'un distributeur, ses décisions affectent l'organisation du réseau de distribution, en le conduisant à déterminer notamment :

- le degré de centralisation du réseau de distribution (ou bien on parlera à l'inverse du degré de hiérarchisation), c'est-à-dire le nombre de niveaux de distribution dans le réseau (avec par exemple un niveau supranational, un national, un régional) ;
- le nombre, la situation géographique et la fonction (stockage, mutualisation des envois par exemple) des centres de distribution à chaque niveau de distribution ;
- la taille (poids et volume) et la fréquence des envois.

Pour un industriel, il existe également des choix relatifs au système de production, qui auront aussi une incidence sur les flux de marchandises avec :

- le nombre et la localisation des sites de production ;
- la spécialisation éventuelle des sites par produit ;
- la sous-traitance et les choix en matière d'approvisionnement.

Naturellement, les arbitrages du système logistique conduisent aussi à réaliser d'autres choix telle la sous-traitance de certaines opérations logistiques (transport, manutention, entreposage, etc.), qui ne sont pas traités ici.

L'ensemble de ces décisions auront des effets notoires sur la circulation des flux de matières et l'organisation des transports. Elles influenceront les distances moyennes de transport, le nombre de relations de transport dans les réseaux, les niveaux de stocks, la

taille (poids et volume) des envois, les modes de transport choisis, le type de véhicule, ainsi que la distance totale de transport et les opportunités de massification des flux de transport. A l'origine de ces décisions, se trouvent des arbitrages entre coûts (production, transport et stockage) et des exigences de qualité de service. Le modèle EOQ (Economic Order Quantity), présenté ci-après, attribué à Arrow, Karlin et Scarf en 1958, et à Magee et Boodman en 1967, se trouve à la base de ce principe essentiel d'arbitrage dans l'organisation logistique. Ce modèle, relativement ancien puisqu'il date des années 50-60, proposait de déterminer la quantité optimale de commande, c'est-à-dire la quantité qui permettait de minimiser la somme des coûts de commande (qui décroissent avec la taille de la commande) et de stockage (qui, à l'inverse, croissent avec les quantités). Le coût du processus de commande tient compte aussi bien des coûts liés à la facturation, que d'une éventuelle adaptation des moyens de production à la commande (notion de série de production lorsqu'une unité fabrique plusieurs produits).

Soit une firme achetant une quantité  $q$  de biens sur une période de temps donnée (par exemple mensuelle), à un prix unitaire  $p$ , le coût du processus de commande étant  $s$ , et  $i$  le coût de stockage exprimé proportionnellement à la valeur du produit, le modèle EOQ donne l'équation suivante pour les coûts logistiques ( $C$ ) :

$$C = \frac{qs}{T} + \frac{ipT}{2} \quad (\text{modèle EOQ})$$

Les coûts liés au processus de commande diminuent lorsque la taille de la commande  $T$  augmente, tandis que les coûts de stockage augmentent (le stock moyen correspondant à la moitié de la commande reçue). Le modèle EOQ donne donc la valeur optimale  $T^*$ , définie comme la quantité optimale de commande, lorsque la dérivée première s'annule :

$$T^* = \sqrt{\frac{2qs}{ip}}$$

Le principe du modèle EOQ repose donc sur le fait que le coût logistique total est constitué de coûts interdépendants évoluant différemment en fonction des quantités. De fait, l'organisation logistique ne peut viser à minimiser les coûts indépendamment les uns des autres sous peine d'augmenter le coût logistique total. Ce modèle a fait l'objet, depuis, de très nombreux développements, mais il fait date car il a montré pour la première fois que les composantes du coût logistique ne pouvaient être traitées indépendamment les unes des autres. Il a ainsi introduit la notion de l'optimum du coût logistique. Une vaste majorité des modèles d'optimisation actuels traitant de l'organisation logistique s'inspirent du modèle EOQ.

Depuis d'autres éléments d'arbitrages ont été mis en avant dans l'organisation logistique, en particulier ceux faisant intervenir les coûts de transport. Cependant, ils ont été introduits le plus souvent comme une part de la constante du coût de processus de commande, c'est-à-dire sans tenir compte de l'influence de la distance et de la taille (poids et volume) de l'envoi sur les coûts de transport. Certains modèles d'optimisation traitant de la localisation des sites de production ou de distribution introduisent néanmoins un coût fixe à la tonne-kilomètre, permettant ainsi de tenir compte de la *variable* distance (voir par exemple Das et Tyagi, 1997 ; McCann, 1998, chapitre 3). Le modèle EOQ prend alors la forme suivante, avec  $v$  le coût de transport exprimé à la tonne-kilomètre (la quantité de produit  $q$  étant exprimée en tonnes) :

$$C = \frac{qs}{T} + \frac{ipT}{2} + dvq$$

Il apparaît ainsi dans cette équation que les coûts de transport sont directement proportionnels aux quantités totales  $q$  transportées et à la distance  $d$  parcourue. Ces modèles ne tiennent donc pas compte de l'influence de la taille de l'envoi  $T$  (poids et volume) sur les tarifs de transport.

Blumenfeld et al. (1985) ont alors proposé, dans une extension du modèle EOQ s'intéressant à des questions d'itinéraires entre des points origines et destinations, d'introduire les coûts de transport sous la forme d'un coût fixe  $f$  indépendant de la taille de l'envoi, considérant que les coûts de transport sont essentiellement les mêmes qu'un véhicule soit plein ou vide. Ce coût fixe  $f$  est estimé *a priori* en fonction du prix moyen pour un chargement complet. Le coût unitaire de transport (par produit) est alors égal à ce coût fixe  $f$  divisé par la taille de l'envoi  $T$ , faisant ainsi apparaître un coût unitaire de transport décroissant avec la taille de l'envoi. En ne tenant pas compte du coût de processus de commande, les coûts logistiques s'expriment alors pour une quantité  $q$  de biens achetés à un prix  $p$  sur une période de temps donnée de la manière suivante (en supposant dans cette équation que la taille  $T$  de l'envoi est inférieure au chargement complet) :

$$C = \frac{f}{T}q + ip(T + mq)$$

On remarque, dans cette équation, que les coûts de stockage ne sont pas divisés par 2, car le stock moyen est valorisé au point de départ et d'arrivée (pour effectuer une expédition de taille  $T$ , il faut *attendre* d'avoir produit  $T$  et donc le stock moyen de départ sera équivalent au stock à destination). Par ailleurs, les auteurs ont aussi ici valorisé le stock lorsqu'il circule, il s'agit du coût de stockage correspondant à la durée  $m$  moyenne de transport. La taille optimale  $T^*$  étant donnée lorsque la dérivée première s'annule, il vient :

$$T^* = \sqrt{\frac{fq}{ip}} \quad (\text{pour } T^* \text{ inférieure au lot complet})$$

Nous ne développerons pas plus ici les modèles d'optimisation basés sur le principe du modèle EOQ, car ils sont extrêmement variés (voir notamment les contributions figurant dans Fleischmann, B. et al., 1998). En revanche, nous nous arrêterons sur la question de la taille de l'envoi et de la prise en compte de son rôle dans les arbitrages, qui nous semble avoir été traitée partiellement dans ces modèles alors qu'elle joue un rôle essentiel.

## 2.2. Prise en compte du rôle de la taille de l'envoi dans les arbitrages du système logistique et les modèles

Quels que soient ces modèles, les coûts de transport sont rarement considérés comme une variable fonction de la taille (poids et volume) de l'envoi. Or les modes de tarification font apparaître des variations importantes en fonction de la taille de l'envoi, correspondant aux modes d'organisation des opérateurs (pour le routier : mono-colis, messagerie, lot partiel ou complet par exemple), ce dont les chargeurs tiennent compte. Il est par ailleurs admis

que le transport routier de marchandises présente des rendements croissants, non seulement sur la distance, mais également sur le chargement moyen (Quinet, 1998, p.164).

Par ailleurs, les modèles s'intéressant au système logistique sont principalement des modèles d'optimisation traitant par exemple du degré optimal de centralisation d'un réseau de distribution, c'est-à-dire liés à la structure des réseaux, ou encore à des problèmes opérationnels, liés par exemple aux itinéraires. En d'autres termes, les décisions faisant intervenir les différentes composantes des coûts logistiques sont le plus souvent traitées indépendamment les unes des autres. Une vaste majorité des modèles d'optimisation en matière de logistique ne tiennent ainsi pas compte de la taille de l'envoi comme une variable endogène au modèle, issue des arbitrages qu'effectuent les chargeurs (entre coûts de transport, coûts liés au stockage et exigences de qualité de service à différents niveaux du réseau logistique).

Il est entendu que les coûts liés au stockage sont fonction de la taille de l'envoi (et sont naturellement liés aux caractéristiques du produit), puisqu'elle a une incidence directe sur les niveaux de stocks. Ces coûts sont donc dépendants du cadencement des envois, c'est-à-dire des choix opérés sur leur fréquence et leur taille, à chaque niveau du réseau de distribution. Mais les coûts de stockage dépendent également des stocks moyens sur l'ensemble du réseau de distribution, et de fait du nombre de centres de stockage et donc de la structure même du réseau (hiérarchisation du réseau, rayonnement géographique et fonction des centres). En d'autres termes, pour comprendre le rôle effectif de la taille de l'envoi dans les organisations logistiques, il est nécessaire de considérer l'organisation logistique comme un système, un tout, permettant de tenir compte des différents arbitrages intervenant dans les décisions du chargeur.

Dans une telle perspective d'analyse systémique, l'enquête chargeurs de 1988 et plus encore l'enquête ECHO de 2004 fournissent des éléments nouveaux, en considérant l'*envoi* comme une unité à part entière, permettant ainsi de lier organisation logistique et flux de marchandises. Des données sur une telle variable sont de nature à nous donner un angle d'analyse nouveau sur le rôle de la taille de l'envoi et sur ses dynamiques d'évolution, c'est-à-dire sur la compréhension des phénomènes qui en sont à l'origine notamment dans le cadre d'une approche systémique. Les premiers résultats de l'enquête ECHO confirment ainsi la tendance à l'augmentation du nombre des petits envois, et même des très petits envois (moins de 30 kg). L'enquête chargeurs de 1988 avait déjà montré que 73% des envois étaient inférieurs à 1 tonne alors qu'ils ne représentaient que 17% des tonnages (Guilbault, 1995, pp.47-59). La nouvelle enquête indique que 85% des envois pèsent maintenant moins de 1 tonne, et 64% moins de 100 kg (Guilbault, 2006, pp.25-46). Ces résultats doivent placer les évolutions relatives à la taille de l'envoi au centre d'une réflexion, pour au moins deux raisons. D'une part, la taille de l'envoi joue probablement un rôle prépondérant dans le choix modal et dans la génération des trafics, d'autre part cette tendance au fractionnement est l'un des signes des profonds changements actuels dans les modes d'organisation logistique évoqués ci-après (systèmes de production et de distribution, et modes de consommation ?).

## Tendances logistiques récentes et évolution de la taille de l'envoi

Les grandes tendances logistiques récentes doivent être perçues tant du point de vue de l'espace que du temps. Nous proposons de formuler les évolutions fortes des organisations logistiques en se plaçant dans chacune de ces deux perspectives.

### 1. Première perspective : une recomposition des organisations logistiques à une échelle supranationale

#### 1.1. La centralisation des structures de distribution

Les phénomènes de centralisation des réseaux de distribution doivent être perçus de deux sortes. Il faut, en premier lieu, distinguer une tendance à la réduction du nombre de niveaux de distribution dans les structures. La structure *traditionnelle* qui comprenait au total trois niveaux de distribution, c'est-à-dire le plus souvent un niveau national, un régional et un local, ainsi que des stocks industriels sur les sites de production, est jugée dorénavant comme étant obsolète. D'après les enquêtes récentes, les structures à deux, voire un niveau de distribution, seraient aujourd'hui les plus répandues en Europe. Celles-ci comprennent le plus souvent soit un niveau national et régional, soit uniquement l'un des deux. La structure la plus décentralisée serait aujourd'hui celle qui comporte deux niveaux de distribution, et la plus centralisée celle dont les expéditions sont effectuées directement depuis le site de production.

Nous n'avons pas mentionné ici le terme de *centres de stockage* mais de *centres de distribution*. L'usage de ce terme générique permet de mettre en avant une autre tendance qui consiste à remplacer des centres de stockage par des plates-formes, destinées aux opérations de groupage et dégroupage, c'est-à-dire au *transit* des marchandises et non à leur stockage. De plus, chaque niveau a été désigné selon un ordre et non pas selon son rayonnement géographique. Il est, en effet, essentiel de distinguer non seulement les différentes fonctions possibles de ces centres, mais également le niveau géographique auquel ils se situent. Il existe en effet une tendance forte à réorganiser la distribution non plus par pays, mais selon des régions supranationales ou paneuropéennes. Il s'agit du deuxième élément important de la centralisation des réseaux de distribution.

Tous ces phénomènes récents sont naturellement liés à la standardisation non seulement de la production mais également de la distribution des produits, et de fait des modes de consommation en Europe. Les développements des réseaux de communication physiques comme informationnels les ont rendus possibles. Cependant, il faut garder à l'esprit que ces tendances d'organisation à un niveau supranational sont encore émergentes, et leur mise en place est étroitement liée à la taille des firmes. Il s'agit de tendances et de volontés d'adaptation qui sont réelles, mais pas toujours traduites dans la réalité autant que l'on pourrait s'y attendre. Il reste de nombreux obstacles à une distribution large des produits au niveau européen - et qui plus est mondiale -, liée à des goûts qui peuvent être fondamentalement différents d'un pays à l'autre, à des critères purement techniques (telles

les prises de courant électrique pour les produits ménagers), ou encore réglementaires (étiquetage des produits dangereux par exemple), etc.

La volonté de transformer les structures de distribution nationales en des structures supranationales est en tous les cas clairement exprimée dans toutes les enquêtes. Les réponses d'une étude de type Delphi réalisée par l'Université de Cranfield qualifiaient les structures paneuropéennes comme étant les moins nombreuses en 1991, mais devant venir en seconde position au cours de la décennie actuelle. Néanmoins, les structures nationales comportant un seul niveau de distribution restaient en première position, et celles comportant deux niveaux se voyaient rétrogradées à la dernière place.

Une autre enquête, réalisée en Europe en 1996 auprès de 300 multinationales, donnait des résultats comparables (O'Sullivan, 1997). Ces réponses indiquaient que les organisations logistiques de ces multinationales se tournaient clairement vers l'Europe, avec une préférence pour un entrepôt central, c'est-à-dire un centre de distribution européen, et des stocks régionaux (le terme de région est à comprendre ici dans le sens de région paneuropéenne, car les entreprises de l'enquête avaient toutes une production et distribution internationales). Ces organisations, considérées comme idéales par ces multinationales, devraient donc succéder à des réseaux de distribution qui étaient jusqu'à présent basés sur des structures nationales. Les résultats de cette enquête mettent également en avant la concentration des sites de production qui sera évoquée plus loin, ainsi que le rôle essentiel des centres de groupage / dégroupage, ou plates-formes, évoqué précédemment.

La mise en œuvre des politiques de réduction des stocks a conduit à remplacer certains centres de stockage par des plates-formes, ces derniers se situant le plus souvent en aval du réseau de distribution. Leur fonction consiste à massifier les transports sur longue distance afin d'en réduire le coût. Cependant, la centralisation des réseaux et leur réorganisation à un niveau paneuropéen, en accroissant les distances, ont aussi conduit certaines firmes à réintroduire des stocks régionaux. La qualité de service étant un critère prépondérant de sélection pour les clients, ces stocks leur permettent de respecter les délais de livraison, notamment dans les régions où la congestion devient problématique. Certaines tendances, en apparence contradictoires, de réduction et d'augmentation simultanées du nombre des plates-formes, concernant en particulier des multinationales, peuvent ainsi s'expliquer.

Par ailleurs, d'autres firmes et des grands distributeurs introduisent aujourd'hui, en plus de leurs centres de distribution existants, des centres de groupage / dégroupage dont la vocation est toujours naturellement de massifier les transports. Ils permettent ainsi aux petits fournisseurs d'expédier sur le plus proche de ces centres des envois consolidés. Ces plates-formes correspondent à la notion assez récente de *mutualisation des envois*, et se justifient par un nombre important de petits fournisseurs. Ces derniers peuvent expédier sur la plate-forme la plus proche des envois consolidés, c'est-à-dire qui étaient auparavant fractionnés et livrés jusqu'aux différents centres de distribution du client. A partir de ces plates-formes, la firme cliente peut constituer des lots complets avec des produits issus de fournisseurs différents, et les expédier sur ses centres de distribution. C'est ainsi qu'il y a quelques années les quatre principaux distributeurs britanniques du secteur alimentaire (Tesco, Sainsbury, Asda et Safeway) avaient implanté des centres de groupage en amont de leurs propres centres de distribution, leur permettant de réaliser d'après eux des gains substantiels. La majorité de ces plates-formes ont été sous-traitées à des prestataires extérieurs et partagées entre les quatre distributeurs.

Certaines firmes présentent une forte capacité à concentrer des volumes importants, les grands industriels et les grands distributeurs. Elles ont alors les moyens d'organiser leur réseau de sorte à massifier les flux de transport, même avec des petits fournisseurs et en pratiquant des organisations en juste-à-temps. Leur réseau se substitue quasiment à celui d'un opérateur de transport, tout en sous-traitant l'ensemble de ces opérations à des prestataires logistiques, et leur permet de réaliser des gains substantiels.

## 1.2. L'organisation de la production : spécialisation, concentration et délocalisations

Depuis quelques années, beaucoup de secteurs d'activités ont réalisé des opérations de fusions et acquisitions. Contrairement à celles des années 80, celles des années 2000 sont analysées comme des réactions défensives dans un contexte d'ouverture des marchés et de concurrence accrue. En se concentrant, ces firmes cherchent à acquérir un pouvoir de marché important en vue de le maîtriser. Nombre de groupes ont ainsi choisi d'abandonner leurs activités les moins rentables ou les moins développées, pour acquérir les moyens de devenir leader à un niveau mondial sur ce qui est couramment appelé leur *cœur de métier*.

Ces processus de concentration sont analysés, actuellement, comme une réponse à un environnement ressenti comme menaçant, y compris sur des marchés qui paraissent déjà concentrés. De tels mouvements de concentration et de spécialisation des firmes ne s'opposent pas à ce qu'il y ait de nouveaux mouvements de diversification des activités dans un avenir plus lointain. Cependant, l'actualité est à ces opérations concomitantes de recentrage d'une part, et de fusions - acquisitions d'autre part. Certaines sont pour le moins spectaculaires tel Unilever qui avait déclaré en février 2000 vouloir supprimer 25 000 emplois et abandonner les trois quarts de ses marques. Pour ce faire, le groupe avait prévu de réduire ses sites de production de 250 à 150, et de ne conserver que 400 marques constituées principalement par des produits dits mondiaux (savon Dove par exemple) ou locaux mais réputés (tel Amora). Dans ce domaine, les exemples sont innombrables et les annonces de ce type sont fréquentes depuis la fin des années 90. En 2007, le groupe a réitéré en déclarant vouloir supprimer plus de 50 000 postes dans le monde, et fermer entre 50 et 60 sites de production, pour céder des métiers considérés comme peu porteurs.

L'évolution des structures productives n'est pas analysée ici en détails, seules certaines évolutions affectant l'organisation des sites de production sont mentionnées. Beaucoup sont accompagnées d'opérations appelées pudiquement de rationalisation de la production, avec une réduction du nombre des sites de production et une spécialisation par produit, afin de réaliser des économies d'échelle. Les sites multi-produits, généralement à vocation nationale, deviennent ainsi mono-produit et à vocation supranationale. D'autres sites sont naturellement délocalisés, mais ce phénomène bien connu concerne aussi toutes les activités à fort taux de main-d'œuvre, et qui ne requièrent pas un haut niveau de compétence. Dans certains secteurs vivement touchés par la concurrence des pays émergents, tel le textile, la production encore localisée dans les pays dits développés correspond à des produits haut de gamme, et surtout techniques (tels le sport, la lingerie) ; mais pour combien de temps encore ?

Nous retiendrons surtout ici que, d'un point de vue spatial, ces tendances logistiques, qui affectent les systèmes de production et de distribution, semblent correspondre à une

réorganisation des réseaux de production et de distribution sur des aires de marché supranationales. Ces changements successifs d'échelle de la taille de marché des firmes ont d'ailleurs été permis par les développements des moyens de communication (transports et systèmes d'information). En d'autres termes, les grandes firmes chercheraient à adapter leurs organisations, non plus sur des bases nationales, mais supranationales, et ainsi à mettre en cohérence leurs systèmes de production avec des marchés se situant à un niveau mondial ou *global*. Ces mutations peuvent être comparées en quelque sorte à une recombinaison des organisations à une échelle supérieure, et sont à mettre en parallèle avec les concepts de globalisation et de firmes transnationales qui sont apparus dans les années 80.

## 2. Deuxième perspective : l'accélération de la circulation des flux matériels et immatériels

### 2.1. La généralisation des organisations en juste-à-temps

Parmi les tendances fréquemment citées dans les organisations logistiques, la généralisation des pratiques en juste-à-temps a permis de réduire considérablement les stocks, en augmentant la fréquence des livraisons dont la taille est de fait réduite. Elle conduit à augmenter la rotation des stocks et permet ainsi d'en réduire les coûts. En minimisant les stocks, le juste-à-temps exige une synchronisation des flux et des activités, et demande des services de transport particulièrement fiables et flexibles. Les systèmes d'information jouent un rôle essentiel, leur développement a probablement à la fois permis et accéléré ce type d'organisation. Cette tendance peut être également perçue du point de vue du système de production ou de distribution.

Du point de vue de la production, elles ont été introduites pour la première fois dans les années 50 dans le processus de production de Toyota, au Japon. Ces méthodes ont conduit le constructeur à améliorer considérablement la coordination des différentes étapes de production, et à introduire un système de communication entre chacune d'elles. L'organisation repose donc sur une volonté de rendre la circulation des flux de matières quasi-continue, en réduisant autant que possible tous les stocks intermédiaires. Cette organisation a également permis au constructeur d'adopter peu à peu une forme de production extrêmement flexible. Une étude réalisée aux Pays-Bas (Jong et al., 1992) a montré que des produits intermédiaires de faible valeur présentaient des valeurs du temps plus élevées que des produits finis présentant même un caractère périssable ou d'obsolescence, parce que précisément ils entraînent dans des processus de production contraignants. Un retard peut, en effet, perturber ou même arrêter par exemple une chaîne de montage, et s'avérer particulièrement onéreux. Il s'agit donc d'une question d'arbitrage entre coûts de transport et de stockage, puisque si ce cadencement des envois permet de réduire les stocks il peut conduire aussi à augmenter les coûts de transport.

Concernant la distribution aux points de vente, la diminution des quantités livrées par commande se révèle également être un moyen de réduction des surfaces de stockage au profit des surfaces de vente (notamment lorsque le coût du foncier est élevé). Les magasins proposent aujourd'hui des assortiments nettement plus larges de produits qu'il y

a une vingtaine d'années par exemple. La Fédération des entreprises du Commerce et de la Distribution affirme ainsi que les volumes de livraison n'ont pas augmenté à Paris, mais que leur contenu s'est considérablement enrichi. En effet, ils offrent maintenant une grande variété de produits correspondant ainsi aux exigences nouvelles des consommateurs. Cette variété implique aussi de plus petites quantités par produit, et des fréquences de livraison plus élevées puisque l'espace de stockage a été réduit. Un vice-président de l'IRI-Secodip<sup>16</sup> indiquait récemment que si le nombre de références et les exigences des consommateurs allaient croissant, il n'en était pas de même des surfaces de vente, obligeant à réduire les surfaces de stockage.

Les modes de consommation ont naturellement considérablement changé, les produits doivent être variés et différenciés (après la standardisation de la production), et disponibles rapidement. Il en résultera une diminution des quantités stockées par produit, et le recours à des prestataires logistiques extrêmement fiables. L'ensemble de ces évolutions ont déjà considérablement favorisé le recours à des prestataires extérieurs, et non pas seulement parce que cela permettait encore une fois d'introduire une certaine flexibilité dans les organisations. L'externalisation a débuté en sous-traitant les activités de transport, aujourd'hui c'est le cas pour plus de 80% des firmes, et l'ELA (European Logistics Association) estimait déjà il y a dix ans que 60% sous-traitaient aussi leurs activités d'entreposage (A.T. Kearney, 1999). L'externalisation de ces prestations logistiques a été mise en exergue par la nécessité de professionnels spécialisés, plus compétitifs en termes de coûts et de qualité de service. Le rôle des prestataires logistiques ne cesse de s'étendre, partis généralement d'une activité de transport, elle englobe aujourd'hui parfois, outre la distribution, des activités d'étiquetage, d'emballage, voire même d'assemblage.

---

<sup>16</sup> *Société d'Études de la Communication, Distribution et Publicité*

## 2.2. Accélération de la circulation des flux, coût des stocks et taille de l'envoi

A partir d'une notion très répandue d'organisation dite en juste-à-temps qui s'est étendue de la production à la distribution, il en ressort que les systèmes logistiques tendent tous vers un même concept : celui de la circulation continue des flux physiques (et de manière concomitante des flux d'information), circulation qui tend à s'accélérer. Ces notions de continuité et d'accélération sont dues au fait que le juste-à-temps a permis de diminuer tous les stocks intermédiaires dans le système de production, d'augmenter incontestablement la rotation des stocks, et ainsi de diminuer le temps d'immobilisation des produits dans l'ensemble du réseau. La notion d'accélération se retrouve aussi dans les changements structurels des réseaux de distribution évoqués précédemment, avec leur centralisation qui a permis de réduire le nombre de centres de stockage des produits, et l'introduction de plates-formes dédiées au *transit* des marchandises en lieu et place des centres de stockage. Ces notions de coûts liés au stockage en général, et plus particulièrement au coût du capital immobilisé qu'ils induisent, prennent progressivement une place plus importante dans les organisations stratégiques logistiques, et la taille de l'envoi y joue un rôle important.

Compte tenu de la valeur du stock moyen, et de la notion du coût du capital immobilisé, le taux de rotation calculé comme indiqué ci-dessous fournit un ratio financier important. Il est à noter que ce type de ratio doit être comparé, pour évaluer la performance d'une firme donnée, uniquement dans son secteur d'activité et pour un produit comparable (puisque'il est extrêmement dépendant du type de produit fabriqué comme des caractéristiques de la demande).

Généralement, le taux de rotation des stocks se calcule sur une base annuelle de la façon suivante :

Ventes annuelles / Valeur du stock moyen

En se plaçant du point de vue de la fonction logistique, le taux de rotation des stocks peut s'exprimer d'une autre manière, en nombre de jours :

Valeur du stock moyen / Ventes annuelles x 365j

Le nombre de jours ainsi obtenu est équivalent au nombre moyen de jours d'immobilisation d'un produit dans un centre de distribution par exemple, ou peut être calculé dans l'ensemble du réseau de distribution dans lequel il circule.

Les coûts de stockage, appelés parfois coûts intrinsèques des stocks, peuvent être estimés en pourcentage de la valeur du produit stocké (qui peut être son prix). Ils sont alors évalués pour un type de produit, dans un centre de stockage, généralement de la manière suivante (comme dans le modèle classique EOQ présenté précédemment) :

$$C_{stock} = P_i \times \frac{T}{2}$$

Le stock moyen correspond à la quantité moyenne de produits en stock, c'est-à-dire à la moitié des quantités livrées (envoi de taille  $T$ , correspondant aux quantités expédiées). Le coût du stock moyen est donc estimé par la valeur du produit  $P$  et un taux  $i$ , annuel ou mensuel, selon la période de temps considérée pour le calcul. Ce taux correspond au coût

du capital immobilisé, à apparenter au coût interne des capitaux pour des projets à faible risque. Mais le coût intrinsèque des stocks doit, en principe, prendre également en compte la tenue du stock (assurances, taxes), l'espace de stockage occupé et les risques sur stocks (obsolescence, vols, etc.). Il est à distinguer du coût d'entreposage qui correspond à l'ensemble des activités et opérations liées à l'entrepôt. Ce taux  $i$  dépend donc principalement des caractéristiques du produit, et peut être assez variable d'une firme à l'autre, il est le plus souvent estimé entre 20 et 30% par an (voir notamment les estimations d'A.K. Samii, 2000), mais il doit aussi considérer des coûts tel celui du foncier.

Le coût intrinsèque des stocks est donc directement proportionnel à la quantité de produits stockés. Il peut être ramené à un coût unitaire, soit en considérant  $Q$ , les quantités annuelles ou mensuelles reçues :

$$C_{stock}(unitaire) = \frac{Pi \times T}{Q \times 2}$$

C'est avec cette expression du coût unitaire de stockage que la notion de rotation des stocks prend tout son sens, et montre l'importance de la taille de l'envoi. En effet, deux entrepôts distincts peuvent avoir en moyenne en stock des quantités identiques de produits mais ces stocks, lorsqu'ils sont rapportés aux quantités totales qui ont circulé par chacun de ces entrepôts, peuvent présenter un coût unitaire fort différent. Le coût des stocks doit donc être rapporté aux quantités, le coût unitaire de stockage est directement lié au taux de rotation, tandis que le prix unitaire de transport (à la tonne ou au produit) est directement fonction de la taille de l'envoi, mais est totalement indépendant de la quantité totale à moins qu'elle ne permette de contribuer à massifier les envois.

La notion de coût des stocks est ainsi directement liée au temps que va rester immobilisé le produit dans un réseau, et donne peut-être ainsi un exemple d'application très concret de l'expression *le temps c'est de l'argent*.

## Conclusion

Face à cette vraisemblable accélération de la circulation des flux, à la fois matériels et immatériels, et à l'importance quasi-stratégique donnée à certains ratios financiers en lien avec la notion de coût intrinsèque des stocks et de coût du capital immobilisé, on est en droit de se demander si la taille de l'envoi ne joue pas un rôle essentiel ? Compte tenu des tendances logistiques exposées précédemment, et de l'importance des coûts liés aux stocks qui interviennent directement dans les arbitrages logistiques, la valeur du produit (valeur/kg) d'une part et les quantités totales qui circulent d'autre part peuvent *a priori* directement influencer les évolutions de la taille (poids et volume) des envois. C'est pourquoi sur la base des données de l'enquête ECHO et des premiers résultats d'analyse, un projet baptisé TEOL (Taille de l'Envoi et Organisation Logistique), en collaboration avec l'équipe SPLOT de l'INRETS, a été initié fin 2007 afin de tester plusieurs hypothèses sur les dynamiques d'évolution de la taille de l'envoi et de les analyser en simulant les arbitrages du système logistique à l'aide d'un modèle de Dynamique des Systèmes (permettant ainsi une approche systémique de l'organisation logistique).

## Références

- A.T. Kearney, (1993). Logistics Excellence in Europe. Bruxelles : European Logistics Association, 58p.
- A.T. Kearney, (1999). Insight to Impact, Bruxelles : European Logistics Association, 35p.
- Blumenfeld, D. E., & Burns, L. D., & Diltz, J. D., & Daganzo, C. F., (1985). Analysing trade-offs between transportation, inventory and production costs on freight networks, *Transportation Research B*, Vol.19, n°5, pp.361-380.
- Cranfield Centre for Logistics and Transportation, (1994). Logistics Futures in Europe – A Delphi Study, Cranfield: Cranfield University, 109 p.
- Das, C., Tyagi R., (1997). Role of Inventory and Transportation Costs in Determining the Optimal Degree of Centralization, *Transportation Research E*, Vol.33, n°3, pp.171-179.
- De Jong, G.C., & Gommers, M.A., & Klooster, J.P.G.N., (1992). Time Valuation in Freight Transport: Methods and Results, PTRC, Manchester.
- Fleischmann, B. et al. (edited by), (1998). Advances in Distribution Logistics, Lectures Notes in Economics and Mathematical Systems, Berlin: Springer, 535 p.
- Gacogne, V., (2003). Impact des coûts de transport sur les systèmes logistiques par une modélisation en dynamique des systèmes – Le modèle SANDOMA, Paris: ENPC, 262 p., Thèse pour le doctorat de transport.
- Guilbault, M., (1995). Choix modal : éléments de cadrage de la demande et mise en perspective du transport combiné, RTS, n° 46, pp.47-59.
- Guilbault, M., (2006). Poids des envois, Enquête ECHO – premiers résultats d'analyse, INRETS, pp. 25-46.
- McCann P., (1998). The Economics of Industrial Location - A Logistics-Costs Approach. Berlin: Springer, 228p.
- O'Sullivan, D., (1997). Logistics in Europe – the vision and the reality, *Logistics Information Management*, Vol. 10, n°1, pp.14-19.
- Quinet, E., (1998). Principes d'économie des transports, Paris: Economica, 419 p.
- Samii, A .K., (2000). Stratégies logistiques, Paris: Dunod, 319 p.



## **ANNEXE 2 : Coûts de possession des stocks et modèle d'arbitrage entre modes de transport**

Auteurs : Daniel DANAU et Charles RAUX

Nous présentons un modèle d'arbitrage entre coûts de transport (choisir un mode plus rapide mais plus cher à la tonne-kilomètre transporté) et coûts de possession du stock (le stock détenu par le producteur en entrepôt ou au cours du transport vers le consommateur a un coût d'opportunité).

Nous commençons par poser le problème en nous appuyant sur un modèle standard de gestion des stocks et en y ajoutant les coûts de transport avec les économies d'échelle associées à la technologie du transport. Puis nous analysons le jeu de différentes contraintes, celles relatives au rythme de production et consommation, ainsi que celles relevant de la discontinuité des capacités de transport dans les modes routier, ferroviaire et fluvial. Nous montrons comment ces contraintes peuvent modifier l'efficacité d'incitations économiques à réduire les véhicules-kilomètres parcourus, comme la taxe kilométrique ou la taxe sur les carburants.

### **Modèle de gestion des stocks avec coûts et délais de transport**

---

La gestion des stocks est généralement traitée comme un problème de choix de la taille optimale de stock d'inputs à utiliser dans la production d'un bien. La pratique distingue entre deux différentes méthodes dans l'organisation des flux de stocks.

La première est nommée « quantité économique de commande » (ou *Economic Order Quantity*, EOQ). Le modèle EOQ a été proposé par Harris (1913) et popularisé par Wilson dans les années 30. Dans cette organisation, la firme planifie le nombre de commandes et la taille de chacune d'elles de manière à satisfaire un taux de consommation constant de pièces nécessaires. La solution de EOQ est la taille du lot à commander. La solution arbitre entre un nombre de cycles de production-distribution plus élevé, ce qui réduit le coût de possession du stock, et une taille de lot de commande plus élevée, ce qui réduit la part relative des coûts fixes de commande et de lancement de la production.

La seconde méthode est celle de la quantité de commande par période (ou *Period Order Quantity*, POQ). Dans cette configuration, la firme organise son activité de manière à couvrir les consommations soudaines d'inputs. Cela résulte de l'incertitude sur les besoins en inputs au cours du temps. Plutôt que de planifier le nombre et la taille des commandes

sur un long intervalle de temps, la firme attend simplement la révélation des besoins de consommation, avant de passer une commande pour les inputs nécessaires.

La seconde méthode est rigide car la taille du stock n'est pas vraiment choisie. L'EOQ est par contre intéressante pour notre analyse, dans laquelle nous voulons comprendre le processus d'interaction de la gestion des stocks avec les décisions de transport. La particularité de notre modèle avec la plupart de la littérature au sujet des stocks est que nous caractérisons la taille du stock de produits finaux (plutôt que des inputs), qui sont à transporter vers un marché de consommation.

Nous voulons caractériser les décisions optimales d'une firme qui produit un bien et doit le transporter vers ses clients. C'est pourquoi notre problème n'a de sens que si les consommateurs du bien sont placés dans une zone différente de celle où est produit le bien.

## Cycles de production et consommation

---

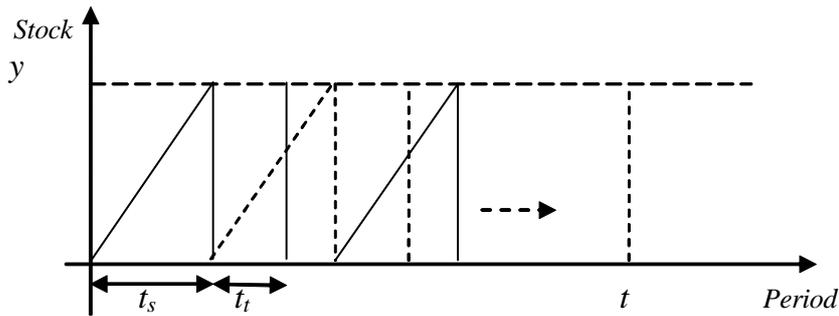
On appelle  $t$  (par exemple une année) la durée de  $n$  cycles de production. Comme dans la plupart de la littérature, nous supposons que la demande par unité de temps  $D/t$  est continue et uniformément distribuée. Cette hypothèse correspond de manière satisfaisante aux situations observées dans la réalité, où les entreprises produisant à grande échelle servent une demande tout à fait stable durant l'année<sup>17</sup>. Le marché s'équilibre à un niveau de quantité  $Q$  qui satisfait  $Q = D$ . Le marché est concurrentiel, ce qui signifie que la firme ne peut influencer stratégiquement ce dernier en prenant ses décisions au sujet de ses activités de production et de transport. La conséquence pertinente pour notre analyse est qu'il est infiniment coûteux pour la firme de produire moins que  $Q$  pendant la période  $t$ .<sup>18</sup>

La Figure 1 illustre le rythme temporel des activités de production et de transport sur la période  $t$ .  $t_p$  mesure la durée d'un cycle de production. A la fin de chaque cycle, la production cumulée  $y$  est affrétée vers le marché de consommation avec une durée de transport  $t_t$ .

---

<sup>17</sup> Avec une demande stochastique, l'EOQ et la POQ interagissent. Le modèle que nous présentons par la suite peut être complexifié de façon à considérer des chocs imprévisibles de demande.

<sup>18</sup> Que la firme puisse rationner les consommateurs de temps en temps est une question ouverte dans la littérature sur la gestion des stocks, où la structure de marché et la concurrence n'ont pas été explorées. Cependant, cette question dépasse le sujet de notre analyse et c'est pourquoi nous supposons que les interruptions de consommation ne doivent pas exister.



**Figure 1**

Comme le nombre  $n$  de cycles de production doit être entier, la période  $t$  d'analyse (par exemple, 1 an ou 1,2 an) est endogène. On vérifie la relation suivante entre le nombre  $n$  de cycles de production, la taille optimale  $y$  correspondant à un cycle de production, sa durée  $t_s$  et la durée totale  $t$

$$n = \frac{Q}{y} = \frac{t}{t_s} \quad (1)$$

On cherche le nombre optimal de cycles de production qui minimise le coût total du producteur. C'est équivalent à chercher la valeur inconnue de  $y$  ou celle de  $t_s$ .

Ce problème a un sens si deux conditions sont satisfaites. Premièrement,  $n \geq 1$ , ce qui est équivalent à  $Q \geq y$ . Deuxièmement, la durée de la production de  $y$  doit être strictement positive, de manière que  $t_s \geq dt$ , où  $dt$  est l'unité de temps. Avec (1) cette condition peut aussi être écrite  $y \geq \frac{Q}{t} dt$ .

On peut remarquer que ces inégalités dépendent toutes deux de  $Q$ , la demande totale qui doit être satisfaite dans la période. Pour cette raison, nous appellerons ces deux conditions, dans ce qui suit, les contraintes de consommation du modèle. Ces deux contraintes qui doivent être vérifiées simultanément sont réécrites comme

$$\frac{Q}{t} dt \leq y \leq Q \quad (2)$$

## Coûts de possession des stocks

---

Tout triangle de la Figure 1 a deux segments perpendiculaires  $t_s$  et  $y$ , tandis que la pente du segment oblique est la pente de production (ou de consommation) du bien. La quantité moyenne stockée durant la production et le transport est  $y/2$ . De même, la quantité moyenne stockée entre l'arrivée à destination et la consommation complète est  $y/2$ . Au total, la quantité moyenne stockée durant un cycle de production-consommation est  $y$ .

Nous ajoutons maintenant l'immobilisation du stock durant son transport.  $t_t : K \rightarrow T$  est la durée du transport nécessaire pour un véhicule de capacité  $k \in K$  pour aller du lieu de production au lieu de destination. Le stock moyen transporté pendant la période  $t$  est  $yn \frac{t_t(k)}{t} = Q \frac{t_t(k)}{t}$

Le stock moyen de la période devient

$$y + Q \frac{t_t(k)}{t} \quad (3)$$

Nous remarquons que le stockage et le transport de biens sont deux activités avec des poids différents dans le temps moyen passé dans chaque cycle de production. Une durée  $t_t$  de transport plus longue accroît le stock moyen immobilisé dans le transport et de là le coût total de possession.

Nous notons  $c_f$  le coût d'opportunité associé à la possession d'une unité de bien durant la période  $t$ , au lieu de réaliser la vente. Nous notons aussi  $c_w$  le coût lié à l'entreposage du bien. La taille du stock varie de 0 à  $y$  durant chaque cycle de production (consommation), ce qui fait que le producteur a besoin d'une capacité d'entreposage égale au moins à  $y$ . Le coût de location de cette capacité d'entreposage est égale à  $c_w y$ .

De là on peut écrire le coût de possession du bien durant la période  $t$

$$C_s(y, k) = c_f \left( y + Q \frac{t_t(k)}{t} \right) + c_w y \quad (4)$$

Cette équation montre que le coût de possession croît linéairement avec la taille du stock  $y$  qui est transporté vers le marché de consommation et avec la durée du transport. Ce résultat est similaire à celui de Burns et al (1985). Cependant, notre cadre est différent de celui de ces auteurs car, dans notre approche, la capacité  $k$  choisie influence la durée  $t_t(k)$  du transport. Par exemple, la durée du transport par route n'est pas très sensible à la taille du camion, mais différents modes de transport (routier, ferré ou fluvial) ont des durées de

transport différentes. Comme  $k$  dépend de  $y$ , la décision au sujet de  $y$  influence non seulement le coût de possession à cause du stockage mais aussi de la durée  $t_i$  de transport.

## Coûts de transport, économies d'échelle

---

Le type de chaque véhicule est identifié par sa capacité  $k$ . le coût d'une capacité  $k$  de transport, quand le véhicule est chargé au niveau  $x \leq k$ , est  $TC(x, k)$ . Nous faisons la distinction entre la charge  $x$  du véhicule et la taille du lot  $y$  car l'envoi de  $y$  peut nécessiter plus d'un véhicule, i.e. on peut avoir  $y > k$ . Nous définissons le coût de transport<sup>19</sup>

$$TC(x, k) = c_0(k) + c_1(k)x$$

$c_0(k)$  est le coût fixe d'exploitation du véhicule, regroupant les frais journaliers de personnel (chauffeurs), les coûts de circulation du véhicule à vide, incluant les coûts de carburant et d'entretien (rappelons que nous considérons la distance comme fixée), ainsi que les coûts de structure.  $c_0(k)$  est tel que  $\Delta c_0(k) = c_0(k + \Delta k) - c_0(k) > 0$  pour toute capacité  $k$  et tout incrément positif de capacité  $\Delta k$ .

$c_1(k)$  est le coût appliqué au carburant supplémentaire consommé proportionnellement à la charge  $x$ .  $c_1(k)$  est tel que  $\Delta c_1(k) = c_1(k + \Delta k) - c_1(k) < 0$  pour toute capacité  $k$  et tout incrément positif de capacité  $\Delta k$ .

### Données empiriques de coût et de technologies du transport de marchandises

Nous considérons trois modes, routier, ferré et fluvial et, pour chacun de ces modes, un ou plusieurs types de charge utile.

#### *Mode routier*

Concernant le mode routier, nous avons considéré trois types de véhicules, distingués selon leur charge utile, soit 6 tonnes, 16 tonne et 25 tonnes. Les données de coûts sont disponibles auprès du Comité National Routier (CNR, 2008). Nous avons organisé ces données de coûts en considérant d'une part un coût fixe journalier et les coûts variables.

Le coût fixe journalier inclut les coûts de personnels calculés sur une journée de 10h de fonctionnement, les coûts de véhicule rapportés à une journée (coûts de détention du véhicule, assurances et taxes) et les coûts de structure.

---

<sup>19</sup> Nous supposons pour simplifier, que le producteur paie pour transporter  $y$  exactement le coût technologique TC. C'est la situation où soit le producteur effectue le transport pour son compte propre, soit le marché du transport est concurrentiel.

Les coûts variables incluent un terme kilométrique hors carburant et un terme kilométrique de carburant. Le terme kilométrique hors carburant, recalculé par nos soins, comprend les coûts d'opération du véhicule à vide (pneus, entretien et réparations, péages routiers). Le terme kilométrique de carburant ajoute à un terme kilométrique constant (carburant consommé à vide) un terme kilométrique variable proportionnel à la charge transportée.

Les caractéristiques essentielles des trois types de véhicules sont données dans le Tableau 1. Il s'agit de données moyennes, reconstituées par nos soins à partir de données de coûts publiées par le CNR. Elles ne visent pas la précision mais un ordre de grandeur reflétant la technologie et les coûts actuels du transport routier de marchandises en France, et surtout l'ampleur des économies d'échelle réalisables.

Mode routier			
charge utile (tonnes)	6	16	25
terme fixe (euros/jour)	240	340	350
terme kilométrique (hors carburant, euro / km)	0.187	0.250	0.177
conso à vide (l / km)	0.200	0.370	0.310
conso / tonne CU (l / tonne / km)	0.013	0.010	0.006

(source : CNR, 2008 et calculs des auteurs)

### **Tableau 1 :**

#### ***Mode ferré***

Les données sur les coûts d'exploitation ferroviaire sont plus difficiles à obtenir. Nous avons malgré tout tenté reconstituer des informations partielles, à savoir le coût d'exploitation d'un train complet sur une distance donnée (à partir des mementos statistiques de la SNCF). Les tarifs des péages ferroviaires sont publics et disponibles auprès de RFF : ils comprennent des parties fixes (droit d'accès et de sillon) et une partie variable selon la distance.

## ***Mode fluvial***

Nous considérons deux capacités typiques de transport fluvial, un automoteur de 1350 tonnes de charge utile et un convoi poussé (barge) de 4400 tonnes de charge utile. Pour chacun de ces deux types de bateaux, nous disposons de données de coûts d'exploitation (Lopez, 2008a, 2008b). Cependant, à la différence de Lopez, nous ne considérons pas que les bateaux sont toujours complètement chargés. Outre l'économie d'échelle résultant du passage à une capacité d'emport supérieure quand la charge à transporter augmente, nous considérons également, comme pour la route, l'économie d'échelle résultant d'un meilleur chargement du véhicule de transport. Ces deux économies d'échelles se traduisent par la combinaison d'un coût fixe et d'un coût variable propres à chaque bateau.

Les coûts fixes (ou coûts de structure) incluent les coûts d'amortissement du bateau, les frais de personnels et d'entretien du bateau, calculés sur une base journalière. Ils incluent également un péage fixe, indépendant de la distance, acquitté auprès de VNF (gestionnaire de l'infrastructure fluviale).

Les coûts variables incluent d'une part un péage proportionnel au tonnage transporté et à la distance parcourue, d'autre part un coût de consommation de carburant, fonction de la puissance du moteur, de la durée du voyage et du chargement du bateau.

Fluvial	automoteur	convoi poussé
charge utile (tonnes)	1350	4400
Fixe journalier (euros)	1600	3200
puissance (chevaux)	1200	2000
vitesse (km/h)	12	12

(source : Lopez 2008a)

**Tableau 2 :**

### **Economies d'échelle dans le transport**

Afin de décrire l'arbitrage entre le coût de possession décrit précédemment et le coût de transport, nous devons analyser les économies d'échelle induites par la technologie du transport. Comme dans Burns et al (1985) nous intégrons l'économie d'échelle d'un meilleur chargement du véhicule. Cependant, nous considérons en outre des capacités

variables de transport  $k$ . Dans notre approche,  $P(y, k)$  varie à la fois en fonction de  $k$  et de  $y$ .

Nous définissons le coût moyen par unité de lot transporté, soit

$$p(y, k) = \begin{cases} \frac{TC(y, k)}{y}, & y \leq k \\ \frac{m(k)TC(k, k) + TC(k', k')}{y}, & y > k \end{cases} \quad (6)$$

où  $m(k)$  est le nombre de véhicules de capacité  $k$  utilisés pour le transport et  $k'$  le plus petit véhicule égal ou supérieur à  $y - m(k)k$ . Notons que quand  $y > k$ ,  $m(k)$  n'est pas nécessairement égal à  $y/k$ , ce qui signifie que le dernier véhicule a une capacité inférieure à  $k$ , i.e.  $k'$ . Si  $y = k$  alors  $m(k) = 1, k' = 0$  et les deux expressions de  $p(y, k)$  sont équivalentes.

Chaque capacité  $k$  appartient à l'ensemble suivant

$$k \in K \equiv \{k_{\min}, \dots, k_{\max}\} \quad (7)$$

où  $0 < k_{\min} < k_{\max}$ . La variable  $k$  n'est pas nécessairement continue, ce qui fait que nous pouvons distinguer deux économies d'échelle distinctes. Elles conduisent, comme nous le verrons, à trois cas distincts dans notre investigation.

Le premier est celui de l'économie d'échelle provenant d'un plus grand chargement du véhicule. En effet, de la définition de  $p(y, k)$  ci-dessus, nous avons pour  $y \leq k$

$$\frac{dp(y, k)}{dy} = -\frac{c_0(k)}{y^2} \leq 0$$

Ce type d'économie d'échelle suggère que le véhicule devrait être complètement chargé de telle manière que  $x = k$ .

La seconde économie d'échelle découle de la possibilité de passer à des véhicules de capacité supérieure. Comme la capacité est discontinue, l'économie d'échelle s'écrit

$$\frac{\Delta p(k, k)}{\Delta k} < 0 \quad (8)$$

Et peut réécrite comme

$$\frac{\Delta p(k, k)}{\Delta k} = \frac{c_0(k)}{k^2} (\alpha_k - 1) + \frac{\Delta c_1(k)}{\Delta k}$$

où  $\alpha_k = \Delta c_0(k) \frac{k}{c_0(k)}$  est l'élasticité de  $c_0(k)$  à  $k$ .

De là, la condition (8) peut être réécrite comme

$$\alpha_k < 1 - \frac{\Delta c_1(k)}{\Delta k} \frac{k^2}{c_0(k)} \quad (9)$$

Cette condition montre que  $c_0(k)$  devrait ne pas être très élastique par rapport à  $k$ .

Comme nous le montrons dans ce qui suit avec les données empiriques, nous avons à la fois

$$\alpha_k < 1 \text{ et } \frac{\Delta c_1(k)}{\Delta k} < 0, \text{ ce qui fait que la condition (9) est vérifiée}^{20}.$$

De (9) il s'ensuit que  $\frac{\Delta p(k, k)}{\Delta k} < 0$ . En outre, pour  $\Delta k \rightarrow dk$ , on a  $\frac{d^2 p(y, y)}{dy^2} > 0$ , ce qui fait que le problème de minimisation a une solution unique.

Notons que, bien qu'il existe une économie d'échelle résultant d'un plus grand chargement quand le véhicule est partiellement rempli, il n'est pas sûr qu'existe toujours une économie d'échelle résultant du passage à un véhicule de capacité supérieure. En effet, si  $k_1, k_2 \in K$  sont deux capacités possibles telles que  $k_1 < y < k_2$ , alors l'inégalité  $p(y, k_2) < p(k_1, k_1)$  n'est pas satisfaite si  $y$  n'est pas assez proche de  $k_2$ .

Le coût total de transport pour le producteur pendant la période  $t$  s'écrit

$$C_t(y, k) = n m(k) TC(k, k) + n TC(y - m(k)k, k) \quad \text{si } y > k$$

$$C_t(y, k) = n TC(y, k) \quad \text{si } y \leq k$$

En utilisant (6) le coût de transport peut s'écrire comme une forme réduite fonction du coût moyen par unité de lot, soit

$$C_t(y, k) = Qp(y, k) \quad (10)$$

---

<sup>20</sup> On peut immédiatement noter que si la condition (9) n'était pas vérifiée, il n'y aurait pas de demande pour les hautes capacités de transport.

## Exemple numérique

Considérons le cas du transport par route avec trois capacités différentes de transport, disponibles typiquement sur le marché européen, soit  $k=6$ ,  $k=16$  et  $k=25$  tonnes. Selon les données empiriques dont nous disposons (cf. supra), le prix par unité de lot transportée décroît avec la capacité, quand le véhicule circule à plein (seconde économie d'échelle). Soit  $p(6,6)=0,15$  ;  $p(16,16)=0,08$  ;  $p(25,25)=0,06$  €/t-km.

Considérons une firme qui produit de l'aspartame et qu'elle doit transporter cette production sur une distance de 500 km en utilisant un des trois types de capacités évoquées ci-dessus. Nos données montrent qu'avec une production annuelle  $Q=100$  tonnes, la taille optimale du lot pour chaque cycle de production-distribution est  $y^*=4$  tonnes, à transporter avec un camion de 6 tonnes de charge utile. Jusqu'à une production annuelle de 700 tonnes, c'est ce type de camion qui permet de minimiser le coût total. A partir de 800 tonnes et jusqu'à 1.700 tonnes de production annuelle, le camion optimal est celui de 16 tonnes de capacité, mais bien sûr avec une taille variable de lot optimal. Par exemple, avec une production annuelle de 1000 tonnes,  $y^*=15$  tonnes.

## Le problème de minimisation des coûts et le problème social

Soit  $c_e$  le coût fixe de préparation d'expédition de chaque lot  $y$ . Sur la période  $t$ , le coût fixe cumulé s'écrit

$$nc_e = \frac{Q}{y} c_e \quad (11)$$

Le coût total supporté par le producteur dans la production de  $Q$  et son transport par lots de taille  $y$  avec des véhicules de capacité  $k$  est

$$C(y, k) = C_s(k, y) + C_t(y, k) + nc_e \quad (12a)$$

De (4), (10) et (11) on obtient

$$C(y, k) = c_f \left( y + Q \frac{t_t(k)}{t} \right) + c_w y + Qp(y, k) + \frac{Q}{y} c_e$$

Le problème du producteur est alors le suivant

$$\begin{cases} \text{Min}_{y, k} C(y, k) \\ \text{s.t. (2) et (7)} \end{cases} \quad (P)$$

Comme on l'a montré précédemment, (2) est une condition de marché, dans la mesure où la consommation continue de  $y$  au marché de destination doit être assurée. (7) est due à la

technologie de transport, qui est telle que la capacité ne peut être considérée comme une variable continue.

Le problème social que nous retenons ici est celui relatif aux engagements internationaux concernant les émissions de gaz à effet de serre. Ces engagements concernent bien entendu le transport, dont l'activité est à l'origine d'une part importante des émissions, du fait de la dépendance au pétrole du moteur à combustion interne, qui règne sans partage dans la plupart des technologies du transport.

Nous étudions par la suite différentes incitations économiques que peuvent mettre en œuvre les pouvoirs publics pour amener le secteur du transport de marchandises à réduire ses émissions. A technologie donnée, ce problème revient à chercher à réduire les véhicules-kilomètres parcourus.

Deux instruments s'offrent au décideur public, la taxe sur les carburants ou la taxe kilométrique. Nous allons donc étudier l'impact de ces deux instruments sur les choix de mode de transport par le producteur, compte tenu des coûts de possession du stock. Nous explorons cet impact dans trois différents contextes, le premier où les contraintes de consommation (2) et de capacité indivisible (7) n'interviennent pas, le second où les contraintes de consommation (2) jouent, puis le troisième où la contrainte de capacité indivisible (7) joue.

### **En l'absence de contraintes**

---

Dans cette situation, les variables qui pilotent la décision sont aussi flexibles que possible.

**Définition 1.** *Considérons  $K$  comme un intervalle continu et supposons que les contraintes (2) et (7) sont relâchées. Quand toutes ces conditions sont satisfaites, nous disons que les contraintes sont non-pertinentes.*

Avec les contraintes non pertinentes,  $y=k$ . Chaque fois que cette condition est satisfaite, nous utilisons  $y$  pour désigner à la fois la capacité du véhicule de transport et la taille du lot. Rappelons que  $\frac{d^2 p(y, y)}{dy^2} > 0$ . De ce fait, le problème de minimisation du coût est robuste. La condition de premier ordre donne

$$y^* = \sqrt{\frac{Qc_e}{c_f + c_w + Q \frac{dp(y, y)}{dy}}} \quad (13)$$

ce qui, avec (6) et  $y=k$  est équivalent à

$$y^* = \sqrt{\frac{Qc_e}{c_f + c_w + Q \frac{d}{dy} \left( \frac{TC(y,k)}{y} \right)}}$$

C'est la solution standard du problème de gestion des stocks, qui résout l'arbitrage entre d'un côté le coût de possession du stock  $C_s$  et, de l'autre, le coût de transport  $C_t$  plus le coût d'expédition. La solution est telle que la taille du lot optimal décroît avec  $c_f, c_w$  et croît avec  $c_e$ .

Soulignons que  $y^*$  dépend de  $\frac{dp(y,y)}{dy}$ , expression qui reflète les économies d'échelle évoquées plus haut. Plus les économies d'échelle sont fortes, plus  $\frac{dp(y,y)}{dy}$  est négatif et plus  $y^*$  croît.

De (13) nous déduisons directement la proposition suivante

**Proposition 1.** *Supposons que les contraintes sont non-pertinentes. La taille optimale du lot  $y^*$  est une fonction de  $\frac{dp(y,y)}{dy}$  et non directement de  $p(y,y)$ .*

La Proposition 1 nous dit simplement que la taille optimale du lot  $y^*$  pour le chargeur, et donc la fréquence de transport, dépend du gradient du coût moyen de transport d'une unité de stock, et non du niveau absolu de ce coût.

Exemple. Supposons que le décideur public ajoute une taxe fixe au coût de transport pour chaque véhicule de capacité  $k$  (ou  $y$ ), soit un coût additionnel  $AC$  à inclure dans le coût de transport total, soit

$$P(y) = TC(y, y) + AC$$

Nous considérons trois régimes distincts de taxation. Le premier est une taxe kilométrique  $a_0 > 0$  (projetée en France). Pour toute distance  $d$  donnée, le coût additionnel est  $AC = a_0 d \equiv a$ . La solution du problème de gestion de stock dans ce cas est

$$y^* = \sqrt{\frac{Q(c_e + a)}{c_f + c_w + Q \frac{d}{dy} \left( \frac{TC(y,k)}{y} \right)}} \quad (14)$$

qui se substitue à la solution générale donnée par (13).

Nos données montrent que  $y^*(a)$  croît avec  $a$ , ce qui montre que l'effet de  $a$  va dans le sens attendu.

Le second régime est une taxe appliquée en proportion de la taille de lot  $y$ , c'est-à-dire  $AC = by$ , avec  $b$  constante positive. Il est évident que la taxe variable  $by$  ne joue aucun rôle dans la pente de  $\frac{dp(y,y)}{dy}$  et la solution (13) est toujours valide. La taxe est inefficace : elle augmente le coût du transport  $P(y)$  pour le producteur sans influencer le choix de  $y$ .

Enfin, nous considérons un troisième régime dans lequel une taxe sur le carburant est appliquée. Rappelons dans l'équation (5) le terme  $c_0(k)$  qui inclut les coûts de carburant pour la circulation à vide du véhicule. Quand une taxe sur le carburant est ajoutée au coût technologique de transport  $TC$  alors le coût fixe  $c_0(k)$  augmente car la consommation à vide augmente avec la taille du véhicule. En outre, le coût  $c_1(k)k$  augmente également (la consommation de carburant augmente avec la charge du véhicule). Cependant  $c_0(k)$  et  $c_1(k)k$  ne changent pas nécessairement dans la même proportion avec la taxe sur le carburant. Il s'ensuit que le coût additionnel de transport induit par l'accroissement du coût du carburant pourrait ne pas être linéaire en  $y$ . Soit  $AC = f(k)$ . La taxe sur le carburant est effective si  $f'(k) > 0$  et  $f''(k) > 0$ .

### **Exemple numérique**

Considérons notre exemple précédent d'une firme produisant de l'aspartame où, dans la situation actuelle ( $d=500$  km,  $Q=1600$  tonnes), la taille de lot optimal est  $y^*=16$  avec un véhicule de  $k=16$  tonnes. Avec une taxe de 0,12 €/km (le niveau moyen prévu en France), la taille optimale de lot devient  $y^*=22$  et le véhicule à privilégier est celui de capacité  $k=25$  tonnes.

### **Contrainte de consommation**

---

Nous discutons maintenant la contrainte de consommation (2) tandis que nous maintenons les autres contraintes non-pertinentes. La valeur supérieure  $y=Q$  n'est pas réellement un problème. Si nous analysons par exemple la production et le transport pendant un an, avec  $Q$  la demande totale sur un an, il est difficile de trouver une situation dans laquelle le producteur aimerait transporter tous ses produits à intervalle de temps de plus d'un an, auquel cas  $y > Q$ . Pour cette raison nous supposons dans ce qui suit que  $y \leq Q$  n'est jamais une condition contraignante.

La contrainte de consommation est pertinente pour la valeur inférieure  $\frac{Q}{t}dt$ . Cette condition montre que le problème de minimisation du coût est contraint à satisfaire la demande qui existe sur le marché de consommation pour chaque unité de temps  $t$ . par exemple, si une firme produit du pain et doit choisir à quel rythme elle doit le transporter à la boutique, elle ne peut ignorer qu'il existe une demande continue d'un certain niveau à chaque période de la journée. Si des consommateurs ne trouvent pas de pain dans la boutique, cette dernière les perdra à l'avenir et pourrait changer de fournisseur. Dans ce cas le producteur n'a pas de souplesse dans l'arbitrage entre les coûts de possession des stocks et les coûts de transport<sup>21</sup>.

Ce problème arrive quand la solution (13) se situe en-dessous de  $\frac{Q}{t}dt$ . Dans ce cas le producteur est contraint de transporter l'item avec un véhicule de capacité  $k = \frac{Q}{t}dt$

Comme auparavant, notre intérêt est de comprendre quel est le rôle joué par le problème de minimisation du coût du producteur quant à la décision de transport. Avec une contrainte de consommation contraignante, une taxe quelconque sur le transport ne jouerait aucun rôle. Un coût plus élevé de transport qui résoudrait la condition de la Proposition 1 rendrait optimal un transport moins fréquent, mais la contrainte de consommation ne permet pas d'attendre de longues périodes pour acheminer la marchandise.

Voyons maintenant quel type de producteurs sont plus vraisemblablement liés par cette contrainte de consommation. On peut énoncer la proposition suivante

**Proposition 2.** *Il existe  $s < 0$  tel que la contrainte de consommation  $y \geq \frac{Q}{t}dt$  est effective pour  $\frac{dp(y,y)}{dy} > s$  et ne l'est pas autrement.*

*Preuve.* La solution intérieure  $y^*$  donnée par (13) croît quand la dérivée négative  $\frac{dp(y,y)}{dy}$

décroit. De plus,  $\frac{Q}{t}dt$  est indépendant de  $\frac{dp(y,y)}{dy}$ . De ce fait, il existe  $s < 0$  tel que

$y^* \geq \frac{Q}{t}dt$  si et seulement si  $\frac{dp(y,y)}{dy} < s$ .

---

<sup>21</sup> Notons que sous notre hypothèse initiale de consommation continue du bien, le rationnement des consommateurs est infiniment coûteux pour la firme. Une analyse plus complète serait d'explorer la décision stratégique de la firme, de rationner ou non les consommateurs selon la concurrence sur le marché. Ce point est laissé à une future recherche.

La Proposition 2 montre que la contrainte de consommation ne joue aucun rôle tant que les économies d'échelle de la capacité des véhicules sont assez fortes. Autrement, si la contrainte de consommation est effective, toute taxe visant à accroître  $y$ , soit est non nécessaire, soit devrait relativement élevée comme le montre l'exemple ci-dessous.

### Exemple

Prenons l'exemple ci-dessus,  $P(y) = TC(y) + a$ , avec  $a = a_0 d$ . Selon la Proposition 2, la taxe  $a$  est effective si et seulement si  $a \geq \underline{a}$  où  $\underline{a}$  est tel que  $y^*(\underline{a}) = Q \frac{dt}{t}$ . Le décideur public a deux choix possibles : pas de taxe, ou une taxe élevée  $a \geq \underline{a}$ . Toute taxe telle que  $0 < a < \underline{a}$  est inefficace.

Remarquons que  $\underline{a}$  croît avec  $Q$ .

Les firmes avec des productions en quantités élevées ont plus de chance d'être liées par cette contrainte de consommation que les petites firmes.

### Capacité indivisible

---

Nous relâchons maintenant l'hypothèse de capacité continument divisible. Comme nous allons le montrer, l'étude de l'indivisibilité est pertinente quand nous comparons les coûts de trois modes distincts de transport, comme la route, le fer ou le fluvial.

Supposons que la taille du lot à transporter est donnée et que l'on doit choisir la capacité pour transporter  $y$ . Avec des capacités indivisibles, le mode de transport choisi est de capacité soit  $\underline{k}(y) = \max\{k/k \leq y\}$ , soit  $\bar{k}(y) = \min\{k/k \geq y\}$ . Le choix d'une capacité  $k < \underline{k}(y)$  est sous-optimal car  $p(y, k)$  décroît avec  $k$ . De plus, le choix d'une capacité plus grande que  $\bar{k}(y)$  est aussi sous-optimal, car le coût de transport serait supérieur à  $TC(\bar{k}(y), y)$ .

Nous analysons donc seulement  $\underline{k}(y)$  et  $\bar{k}(y)$  pour tout  $y$  donné. Comme  $\underline{k}(y) < y$ , les économies d'échelle découlant de l'usage d'une plus grande capacité de transport sont abandonnées quand  $\underline{k}(y)$  est choisie. En effet, dans ce cas, le lot  $y$  est transporté avec plus d'un véhicule de capacité  $\underline{k}(y)$ , alors qu'il pourrait être transporté avec un véhicule de capacité  $\bar{k}(y)$ . La raison pour laquelle un arbitrage existe est que le choix de  $\bar{k}(y)$  est plus coûteux que celui de  $\underline{k}(y)$ . Si  $\bar{k}(y) > y$  est choisie, alors les économies d'échelle découlant d'un plus grand chargement du camion sont abandonnées, car le véhicule de

capacité  $\bar{k}(y)$  est seulement partiellement chargé, alors que des véhicules de capacité  $\underline{k}(y)$  seraient complètement chargés (à l'exception du dernier véhicule).

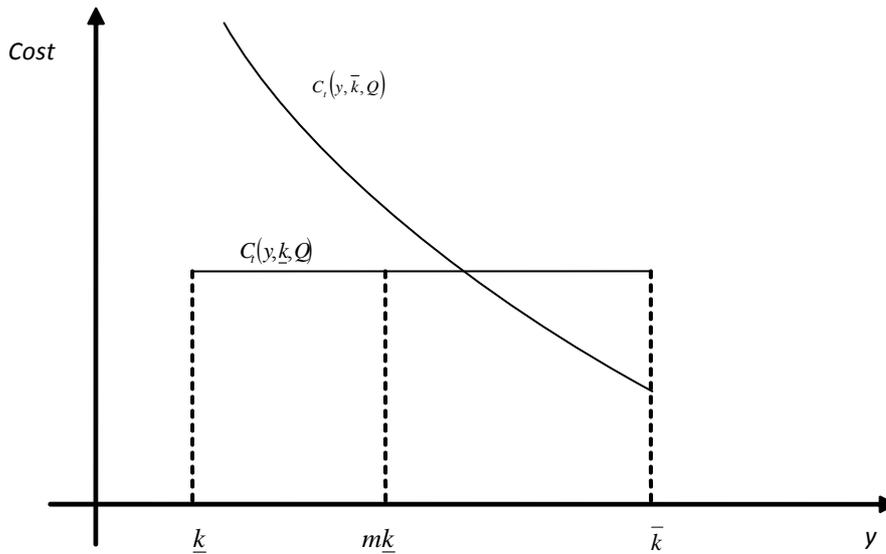
A partir de (10) et du raisonnement ci-dessus on peut écrire le coût de transport comme

$$C_i(y, k) = \begin{cases} Qp(\underline{k}(y), \bar{k}(y)), & \text{si } k = \underline{k}(y) \\ Qp(y, \bar{k}(y)), & \text{si } k = \bar{k}(y) \end{cases} \quad (15)$$

Pour tout  $y$ , le choix à faire est entre les coûts moyens  $p(\underline{k}(y), \underline{k}(y))$  et  $p(y, \bar{k}(y))$ . Dit autrement, le choix est à faire entre une capacité  $\underline{k}(y)$  moindre mais pleinement remplie, et une capacité  $\bar{k}(y)$  plus élevée mais partiellement remplie. Si  $\underline{k}(y) = \bar{k}(y)$  alors nous revenons à notre cas précédent de capacité continument divisible. En outre, lorsque  $\underline{k}(y) = k_{\max}$ ,  $k = \underline{k}(y)$ .

Remarquons ici que la décision au sujet de la capacité  $k$  n'est pas identique à la décision au sujet de  $y$ , comme beaucoup d'études le supposent. Le choix entre  $p(\underline{k}(y), \underline{k}(y))$  et  $p(y, \bar{k}(y))$  considère  $y$  comme donné. Sachant comment la capacité optimale est choisie pour tout  $y$  donné, nous calculons le niveau  $y$  d'items à transporter, qui résout le problème de minimisation du coût ( $P$ ).

Fixons deux capacités  $\underline{k}(y) = \underline{k}$  et  $\bar{k}(y) = \bar{k}$ , et trouvons le lot optimal  $y$  pour chacun des deux cas. De l'équation (15), nous déduisons que le coût de transport est constant par rapport à  $y$  si la capacité  $\underline{k}$  est choisie, tandis que le coût décroît avec  $y$  si  $\bar{k}$  est choisie, comme indiqué dans la Figure 2 ci-dessous.



**Figure 2**

Comme  $\underline{k}$  est fixé on peut écrire  $\frac{dp(y, \underline{k})}{d\underline{k}} = 0$ . Il s'ensuit, en utilisant (13), que le niveau optimal de bien à transporter avec la capacité  $\underline{k}$  est

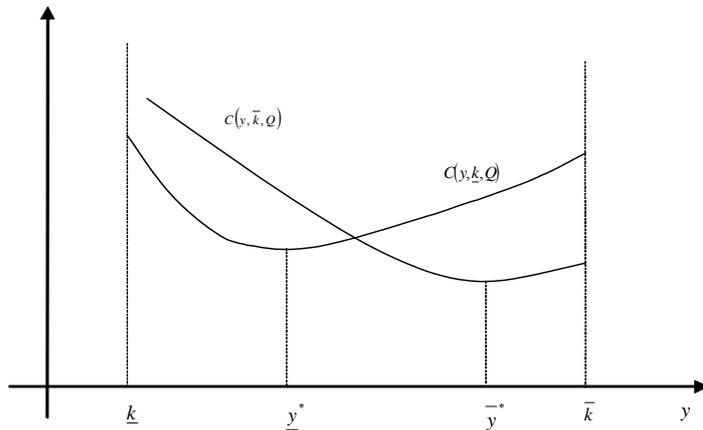
$$\bar{y}^* = \max \left\{ \sqrt{\frac{Qc_e}{c_f + c_w}}; \underline{k} \right\} \quad (16)$$

Notons la différence entre (16) et (13). Le choix à faire ici est le nombre de véhicules de capacité  $\underline{k}$  qui devraient être utilisés pour transporter  $\underline{y}^* \geq \underline{k}$ . La quantité optimale de bien à produire et transporter avec une capacité  $\underline{k}$  est

$$\bar{y}^* = \min \left\{ \sqrt{\frac{Qc_e}{c_f + c_w + Q \frac{\partial p(\bar{y}^*, \bar{k})}{\partial \bar{y}^*}}}; \bar{k} \right\}$$

Comparée à (16), cette dernière équation comprend un terme additionnel  $Q \frac{\partial p(\bar{y}, \bar{k})}{\partial \bar{y}}$  qui apparaît au dénominateur de  $\bar{y}^*$ , et correspond aux économies d'échelle découlant d'un plus grand chargement du véhicule quand  $y < k$ . Avec ce terme additionnel  $\bar{y}^* > \underline{y}^*$ .

Nous pouvons maintenant trouver le choix optimal entre deux capacités en comparant les fonctions de coût correspondant à chaque paire  $\{\underline{y}^*, \underline{k}\}$  et  $\{\bar{y}^*, \bar{k}\}$ . La Figure 3 ci-dessous montre le coût total dans le cas où  $C_t(\bar{y}^*, \bar{k}, Q) < C_t(\underline{y}^*, \underline{k}, Q)$ , tel que la capacité optimale est  $\bar{k}$  et le lot à transporter est  $\bar{y}^*$ .



**Figure 3**

Les deux courbes ont une forme en U, du fait des économies d'échelle. Si la capacité est  $\underline{k}$ , il n'existe pas d'économie d'échelle du fait du transport, mais des économies d'échelle subsistent avec le coût fixe d'expédition  $c_e$ . Si  $\bar{k}$  est choisie, les économies d'échelle résultant d'un meilleur chargement existent.

Un cas particulier est celui où  $\bar{y}^* > \bar{k}$ . Nous remplaçons alors  $\{\bar{y}^*, \bar{k}\}$  par  $\{\bar{k}, \bar{k}\}$ . Un autre cas particulier est celui où  $\underline{y}^* < k_{\min}$ . De même,  $\{\underline{y}^*, \underline{k}\}$  est remplacé par  $\{\underline{y}^{**}, \underline{k}\}$  où  $\underline{y}^{**}$  a la même expression que  $\underline{y}^*$  à la différence près que  $\bar{k}$  est remplacé par  $\underline{k}$  dans (17). Enfin, on pourrait avoir le cas où  $\underline{y}^* > k_{\max}$ . La solution est alors  $\{\underline{y}^*, k_{\max}\}$

**Proposition 3.** Supposons que les capacités de transport sont  $\underline{k}$  et  $\bar{k}$  avec  $\bar{k} > \underline{k}$ . Il existe  $s' < 0$  tel que le producteur préfère  $\bar{k}$  à  $\underline{k}$  si et seulement si  $\frac{\partial p(\bar{y}^*, \bar{k})}{\partial y} < s'$ .

*Preuve.* De l'analyse ci-dessus, le lot optimal qui correspond à la capacité  $\underline{k}$  est  $\underline{y}^*$ . Le coût total du producteur est  $C(\underline{y}^*, \underline{k})$ . Le lot optimal qui correspond à la capacité  $\bar{k}$  est  $\bar{y}^*$ . Dans ce cas le coût total est  $C(\bar{y}^*, \bar{k})$ , qui croît avec  $p(\bar{y}^*, \bar{k})$ .

Supposons maintenant que  $p(\bar{y}^*, \bar{k})$  est variable, tandis que les autres paramètres sont fixés. Alors il existe une certaine valeur de  $p(\bar{y}^*, \bar{k})$  pour laquelle  $C(\bar{y}^*, \bar{k}) = C(\underline{y}^*, \underline{k})$ .

Montrons maintenant ce qui rend  $p(\bar{y}^*, \bar{k})$  variable. A cause d'économies d'échelle résultant d'un meilleur chargement,  $p(\bar{y}^*, \bar{k})$  décroît avec  $\bar{y}^*$ . De plus, avec la définition

de (17),  $\bar{y}^*$  croît quand  $\frac{\partial p(\bar{y}^*, \bar{k})}{\partial y}$  plus rapidement avec  $y$ . Plus généralement, il existe un

certain niveau de  $\frac{\partial p(\bar{y}^*, \bar{k})}{\partial y}$  soit  $s'$ , tel que  $C(\bar{y}^*, \bar{k}) < C(\underline{y}^*, \underline{k})$  si et seulement si

$$\frac{\partial p(\bar{y}^*, \bar{k})}{\partial y} < s'.$$

La Proposition 3 montre que l'indivisibilité de la capacité rend une taxation du service de transport coûteuse.

Cette proposition et ses implications peuvent être aisément expliquées en reprenant notre exemple précédent, dans lequel  $P(y) = TC(y) + a$ . Pour tout  $a$  donné, le lot qui correspond à la capacité  $\bar{k}$  de transport est

$$\bar{y}^*(a) = \sqrt{\frac{Q(c_e + a)}{c_f + c_w + Q \frac{\partial p(\bar{y}^*, \bar{k})}{\partial \bar{y}^*}}} \quad (18)$$

qui est l'expression de (17) pour cette situation particulière. La taille du lot choisie par le producteur pour transporter des biens avec une capacité  $\underline{k}$  est  $\underline{y}^*$ , qui est indépendant de  $a$ .

La taxe minimale qui induit le producteur à choisir la capacité  $\bar{k}$  est  $\underline{a}$ , telle que  $C(\bar{y}^*(\underline{a}), \bar{k}) = C(\underline{y}^*, \underline{k})$ .  $\underline{a}$  n'est pas nécessairement la taxe socialement optimale. Les pouvoirs publics pourraient être intéressés à induire la firme à faire croître la taille du lot  $\bar{y}^*(a)$  au-dessus de  $\bar{y}^*(\underline{a})$ , tant que le véhicule de capacité  $\bar{k}$  n'est pas complètement chargé. Dans les situations précédentes dans lesquelles la capacité était divisible, la taxe  $a$  exploitait les économies d'échelle des capacités supérieures, afin de pousser le producteur

à choisir une plus grande capacité de transport. Ici, avec une capacité indivisible, la taxe  $a$  exploite les économies d'échelle d'un meilleur chargement des véhicules.

Si la capacité  $\underline{k}$  est désirée par les pouvoirs publics, alors aucune taxe ne devrait être imposée au producteur. En ce sens, la taxe  $a$  n'est pas toujours désirable. Inciter, par une taxe, le producteur à choisir une capacité  $\bar{k}$  plutôt que  $\underline{k}$  pourrait être socialement coûteux. Ce coût est déterminé par la différence entre les coûts technologiques  $TC(\bar{k})$  et  $TC(\underline{k})$ , aussi bien que la différence entre une taxe et pas de taxe.

### **Exemple numérique**

Reprenons l'exemple de notre producteur d'aspartame. Supposons que sa production annuelle est de 20.000 tonnes. En l'absence de taxe kilométrique, la taille de lot optimal est  $y^*=25$  tonnes avec des véhicules de capacité  $\underline{k} = 25$  tonnes. Nous ajoutons maintenant un nouveau mode de transport, le mode ferré avec  $\bar{k} = 500$  tonnes. Avec nos données, il faudrait imposer une taxe kilométrique de 1,57 €/km, soit plus de dix fois le montant actuel envisagé, pour inciter le producteur à utiliser le train.

### **Conclusion**

---

Les résultats chiffrés des exemples ne sont que des ordres de grandeur, ils restent à affiner avec des données plus précises sur les coûts et les technologies des modes de transport, si tant est que ces données puissent être obtenues.

D'autres applications du modèle restent encore à effectuer pour explorer pleinement les impacts de tel ou tel instrument économique d'incitation. C'est ce à quoi vont tendre les travaux par la suite. Néanmoins, les premiers résultats, dont certains contre-intuitifs, montrent la pertinence de cette approche.

### **Références**

Aucamp, D., Nonlinear Freight Costs in the EOQ Problem, European Journal of Operational Research 9 (1982) 61 -- 63

Burns, D.L., R.W. Hall, D. E. Blumenfeld et C.F. Daganzo (1985), "Distribution strategies that minimize transportation and inventory costs"

Daganzo, C F (1999), "Logistic systems analysis", Springer Verlag Berlin

Dijkstra, W J and Dings, J M W (1997), "Specific Energy Consumption and Emissions of Freight Transport", CE Delft, December 1997

Doll C. (2005), The German HGV Toll Case Study, Annex 2 to REVENUE Project Deliverable 4. Funded by 5th Framework RTD Programme, ISIS, Rome, July 12th 2005

ECMT (1998), "Efficient Transport for Europe. Policies for Internalization of External Costs", Paris, OECD, p 261

EpE (Entreprises pour l'Environnement) and ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) (2005), "Module Transports de quantification des émissions de gaz à effet de serre (Bilan Carbone)", Paris

Giard, V (2003), "Gestion de la production et des flux", *Economica* (in French)

Harris F., "How Many Parts to Make at Once, *Operations Research*, 38 (1990) 947 --950 (reprint from *Factory -- The Magazine of Management* 10 (1913) 135-136)

Lippman S, Economic Order Quantities and Multiple Set-Up Costs, *Management Science*, 18 (1971) 39 – 47

Lopez, C. (2008a) *Le transport fluvio-maritime, quelle pertinence socio-économique pour le bassin Rhône-Saône ?* Thèse pour le doctorat de sciences économiques. Université Lyon 2

Lopez, C. (2008b) Sea-river shipping competitiveness and its geographical market area for the Rhône-Saône corridor. *Journal of Transport Geography*, Volume 16, Issue 2, March 2008, Pages 100-116.

Nagurney, A. (2006), "On the relationship between supply chain and transportation network equilibria: A supernetwork equivalence with computations", *Transportation Research, Part E*, 42, 293-316

RAUX (C.) 2010. The Potential for CO<sub>2</sub> emissions trading in transport: the case of personal vehicles and freight, *Energy Efficiency*, 2010, DOI 10.1007/s12053-009-9065-7, en ligne <http://www.springerlink.com>

RAUX (C.) 2009. Les droits à circuler échangeables : une forme alternative du péage urbain ?, *Les Cahiers Scientifiques du Transport*, n° 55, 127-154 pp.

RAUX (C.), MARLOT (G.), 2005. A System of Tradable CO<sub>2</sub> Permits Applied to Fuel Consumption by Motorists. *Transport Policy*, 12 (2005) 255-265.

RAUX (C.), 2004. The use of transferable permits in transport policy. *Transportation Research Part D*. Vol 9/3, pp 185-197.

RAUX (C.) 2007. *Les permis négociables dans le secteur des transports*. La Documentation Française, 100 p.

RAUX (C.) 2008. How Should Transport Emissions Be Reduced? Potential for Emissions Trading Systems. In OECD-ITF Round Table 142 (eds) *The Cost and Effectiveness of Policies to Reduce Vehicle Emissions*. OECD Publishing, 42 p.

SNCF (2002), "Mémento de statistiques 2001. Exercice 2001 et rappel de l'exercice 2000", Paris

Terrier, D (2006), "L'année de la grande distribution et des Seveso", *Transports Internationaux et Logistique*", Novembre 2006 (in French)

### ANNEXE 3 : Résultats détaillés de la deuxième série de simulations du projet Carbone-Fret

Tableaux 1&2																		
(Type de simulation effectué) l'organisation logistique résulte de :	Quantité mensuelle expédiée par la firme	Valeur H.T. au kg du produit	"Grands" Livraison directe (oui:1; non:0)	"Petits" Structure 2 niveaux (oui:1; non:0) sinon 3 niveaux	"Grands" Stocks (en jours dans le réseau)+ plates-formes clients	"Petits" Stocks (en jours dans le réseau)	Nbre centres distrib C1 (nbre centres intermédiaires)	Poids envoi T1 (tonnes)	Fréquence envoi F1 (fréquence)	D1 (km) Distance orthodromique	Type Transport Envoi T1 (2: messagerie; 3: réseau; 4:lot; 5:complet)	Poids envoi Tb (tonnes)	Fréquence envoi Fb (fréquence)	Db (km) Distance orthodromique	Type Transport Envoi Tb (2: messagerie; 3:réseau; 4:lot; 5:complet)	Poids envoi Ts (tonnes)	Ds (km) Distance orthodromique	Type Transport Envoi Ts (0: tournées de distribution; 2: messagerie; 3:réseau; 4:lot)
la recherche de l'optimum du coût de distribution pour le chargeur (il s'agit des scénarios de REFERENCE pour toutes les autres simulations)	50 000 tonnes	10 €/kg	0	1	3	2	90	25,00	20,0	229	5	17,28	10,0	51,29	4	5,76	51	4
		1 €/kg	1	1	4	2	120	25,00	15,0	229	5	25,00	6,9	44,42	5	5,76	44	4
	5 000 tonnes	100 €/kg	0	1	3	2	9	25,00	20,0	229	5	1,73	10,0	162,19	3	0,58	162	3
		10 €/kg	0	1	6	3	25	25,00	7,3	229	5	3,28	5,3	97,87	4	0,58	98	3
		1 €/kg	0	1	19	8	90	25,00	2,0	229	5	12,38	1,4	51,19	4	0,58	51	3
		600 €/kg	0	1	4	2	23	1,94	10,0	229	3	0,17	10,0	100,94	3	0,06	101	2
	50 tonnes	100 €/kg	0	1	4	2	22	2,00	10,0	229	3	0,19	9,1	102,63	3	0,06	103	2
		10 €/kg	0	1	13	6	31	5,26	2,7	229	4	0,77	2,3	87,12	3	0,06	87	2
		1 €/kg	0	1	59	33	62	14,87	0,5	229	4	3,03	0,6	61,71	4	0,06	62	2
		600 €/kg	0	1	4	2	23	0,19	10,0	229	3	0,02	10,0	100,95	2	0,01	101	2
100 €/kg		0	1	7	4	26	0,33	5,3	229	3	0,04	3,9	96,31	2	0,01	96	2	
10 €/kg		0	1	32	17	48	0,99	1,0	229	3	0,18	1,0	70,46	3	0,01	70	2	
	1 €/kg	0	1	153	92	98	2,71	0,2	229	3	0,70	0,2	49,11	3	0,01	49	2	
la recherche de la STRUCTURE de distribution qui minimise les émissions de GES; avec un CADENCEMENT des envois réduit artificiellement à l'extrême (scénarios PEU REALISTES qui indiquent en quelque sorte un point bas des émissions de GES)	50 000 tonnes	10 €/kg	1	1	4	2	120	25,00	15,0	229	5	25,00	6,9	44,42	5	5,76	44	4
		1 €/kg	1	1	4	2	120	25,00	15,0	229	5	25,00	6,9	44,42	5	5,76	44	4
	5 000 tonnes	100 €/kg	1	1	32	11	120	25,00	1,5	229	5	25,00	0,7	44,42	5	0,58	44	3
		10 €/kg	1	1	32	11	120	25,00	1,5	229	5	25,00	0,7	44,42	5	0,58	44	3
		1 €/kg	1	1	32	11	120	25,00	1,5	229	5	25,00	0,7	44,42	5	0,58	44	3
		600 €/kg	0	1	142	73	118	18,00	0,2	229	5	7,91	0,2	44,85	4	0,06	45	2
	50 tonnes	100 €/kg	0	1	313	103	120	25,00	0,2	229	5	24,11	0,1	44,42	5	0,06	44	2
		10 €/kg	0	1	320	103	120	25,00	0,2	229	5	25,00	0,1	44,42	5	0,06	44	2
		1 €/kg	0	1	320	103	120	25,00	0,2	229	5	25,00	0,1	44,42	5	0,06	44	2
		600 €/kg	0	1	339	176	120	4,25	0,1	229	4	1,89	0,1	44,42	3	0,01	44	2
100 €/kg		0	1	955	438	69	18,00	0,0	229	5	5,96	0,0	58,56	4	0,01	59	2	
10 €/kg		1	1	3126	1033	120	25,00	0,0	229	5	24,11	0,0	44,42	5	0,01	44	2	
	1 €/kg	1	1	3203	1033	120	25,00	0,0	229	5	25,00	0,0	44,42	5	0,01	44	2	

Tableaux 1&2 (suite)											
(Type de simulation effectué) l'organisation logistique résulte de :	Quantité mensuelle expédiée par la firme	Valeur H.T. au kg du produit	Distance totale réelle parcourue (km route)	Emissions kg CO2-e / tonne produit	"Option rail" Emissions kg CO2-e / tonne produit	Emissions kg CO2-e / tonne produit envoi T1	"Option rail" Emissions kg CO2-e / tonne produit envoi T1	Coût de distrib moyen TOTAL par produit	Coût de distrib plate-forme "Grand client" par produit	Nbre de liaisons fer si "option rail"	Coût additionnel par tonne produit si "option rail" (+24h)
la recherche de l'optimum du coût de distribution pour le chargeur (il s'agit des scénarios de REFERENCE pour toutes les autres simulations)	50 000 tonnes	10 €/kg	340	30	12	895708	102955	0,06	0,03	1	4,96
		1 €/kg	273	25	7	895708	102955	0,04	0,01	1	0,50
	5 000 tonnes	100 €/kg	451	47	30	89571	10295	0,32	0,23	1	49,64
		10 €/kg	387	35	18	89571	10295	0,12	0,08	1	4,96
		1 €/kg	340	31	14	89571	10295	0,07	0,03	1	0,50
		600 €/kg	510	56	38	15004	7077	1,83	1,18	1	297,83
	500 tonnes	100 €/kg	511	56	38	15004	7077	0,66	0,43	1	49,64
		10 €/kg	496	46	29	11306	3379	0,33	0,18	1	4,96
		1 €/kg	470	37	20	11306	3379	0,20	0,07	1	0,50
		600 €/kg	510	56	38	1500	708	3,14	2,05	1	297,83
	50 tonnes	100 €/kg	505	55	38	1500	708	1,71	1,02	1	49,64
		10 €/kg	479	53	35	1500	708	0,95	0,40	1	4,96
	1 €/kg	458	51	33	1500	708	0,62	0,16	1	0,50	
la recherche de la STRUCTURE de distribution qui minimise les émissions de GES; avec un CADENCEMENT des envois réduit artificiellement à l'extrême (scénarios PEU REALISTES qui indiquent en quelque sorte un point bas des émissions de GES)	50 000 tonnes	10 €/kg	273	25	7	895708	102955	0,06	0,03	1	4,96
		1 €/kg	273	25	7	895708	102955	0,04	0,01	1	0,50
	5 000 tonnes	100 €/kg	273	26	9	89571	10295	2,32	2,18	1	49,64
		10 €/kg	273	26	9	89571	10295	0,28	0,23	1	4,96
		1 €/kg	273	26	9	89571	10295	0,07	0,03	1	0,50
		600 €/kg	334	31	13	8957	1030	55,02	41,24	1	297,83
	500 tonnes	100 €/kg	273	26	9	8957	1030	22,03	20,94	1	49,64
		10 €/kg	273	26	9	8957	1030	2,37	2,18	1	4,96
		1 €/kg	273	26	9	8957	1030	0,34	0,23	1	0,50
		600 €/kg	453	42	25	1131	338	131,73	98,31	1	297,83
	50 tonnes	100 €/kg	347	32	14	896	103	63,72	51,74	1	49,64
		10 €/kg	273	26	9	896	103	22,30	20,94	1	4,96
	1 €/kg	273	26	9	896	103	2,64	2,18	1	0,50	

Tableaux 3&4																		
(Type de simulation effectué) l'organisation logistique résulte de :	Quantité mensuelle expédiée par la firme	Valeur H.T. au kg du produit	"Grands" Livraison directe (oui:1; non:0)	"Petits" Structure 2 niveaux (oui:1; non:0) sinon 3 niveaux	"Grands" Stocks (en jours dans le réseau)+ plates-formes clients	"Petits" Stocks (en jours dans le réseau)	Nbre centres distrib C1 (nbre centres intermédiaires)	Poids envoi T1 (tonnes)	Fréquence envoi F1 (fréquence)	D1 (km) Distance orthodromique	Type Transport Envoi T1 (2: messagerie; 3: réseau; 4:lot; 5:complet)	Poids envoi Tb (tonnes)	Fréquence envoi Fb (fréquence)	Db (km) Distance orthodromique	Type Transport Envoi Tb (2: messagerie; 3:réseau; 4:lot; 5:complet)	Poids envoi Ts (tonnes)	Ds (km) Distance orthodromique	Type Transport Envoi Ts (0: tournées de distribution; 2: messagerie; 3:réseau; 4:lot)
la recherche de l'optimum du coût de distribution pour le chargeur avec une AUGMENTATION de 100% des PRIX DU CARBURANT (par rapport au scénario de référence)	50 000 tonnes	10 €/kg	0	1	3	2	90	25,00	20,0	229	5	17,28	10,0	51,29	4	5,76	51	4
		1 €/kg	1	1	4	2	120	25,00	15,0	229	5	25,00	6,9	44,42	5	5,76	44	4
	5 000 tonnes	100 €/kg	0	1	4	2	26	17,54	10,0	229	4	1,73	10,0	96,06	3	0,58	96	3
		10 €/kg	0	1	6	3	31	25,00	5,8	229	5	3,45	5,0	87,37	4	0,58	87	3
		1 €/kg	0	1	21	10	112	25,00	1,6	229	5	13,02	1,3	46,01	4	0,58	46	3
	500 tonnes	600 €/kg	0	1	4	2	26	1,75	10,0	229	3	0,17	10,0	95,96	3	0,06	96	2
		100 €/kg	0	1	4	2	25	1,84	10,0	229	3	0,20	8,8	98,30	3	0,06	98	2
		10 €/kg	0	1	14	7	37	5,36	2,2	229	4	0,79	2,2	79,52	3	0,06	80	2
		1 €/kg	0	1	67	40	73	15,38	0,4	229	4	3,17	0,5	56,77	4	0,06	57	2
	50 tonnes	600 €/kg	0	1	4	2	26	0,18	10,0	229	3	0,02	10,0	96,04	2	0,01	96	2
100 €/kg		0	1	8	4	31	0,33	4,4	229	3	0,04	3,8	88,10	2	0,01	88	2	
10 €/kg		0	1	35	20	56	1,00	0,8	229	3	0,18	1,0	65,10	3	0,01	65	2	
1 €/kg		0	1	171	109	114	2,78	0,1	229	3	0,72	0,2	45,65	3	0,01	46	2	
la recherche de la STRUCTURE de distribution qui minimise les émissions de GES; en laissant le modèle calculer le cadencement des envois optimum pour le chargeur	50 000 tonnes	10 €/kg	0	1	3	2	120	25,00	15,0	229	5	17,28	10,0	44,42	4	5,76	44	4
		1 €/kg	1	1	4	2	120	25,00	15,0	229	5	25,00	6,9	44,42	5	5,76	44	4
	5 000 tonnes	100 €/kg	0	1	4	2	25	18,00	10,0	229	5	1,73	10,0	97,34	3	0,58	97	3
		10 €/kg	0	1	6	3	45	18,00	5,6	229	5	3,11	5,6	72,78	4	0,58	73	3
		1 €/kg	0	1	21	11	120	25,00	1,5	229	5	12,17	1,4	44,42	4	0,58	44	3
	500 tonnes	600 €/kg	0	1	4	2	120	0,38	10,0	229	3	0,17	10,0	44,42	3	0,06	44	2
		100 €/kg	0	1	5	3	120	0,57	6,5	229	3	0,17	10,0	44,42	3	0,06	44	2
		10 €/kg	0	1	15	9	83	3,00	1,8	229	4	0,71	2,4	53,51	3	0,06	54	2
		1 €/kg	0	1	56	29	45	18,00	0,6	229	5	3,11	0,6	72,78	4	0,06	73	2
	50 tonnes	600 €/kg	0	1	4	3	120	0,04	8,4	229	2	0,02	10,0	44,42	2	0,01	44	2
100 €/kg		0	1	10	6	120	0,14	2,7	229	3	0,04	4,4	44,42	2	0,01	44	2	
10 €/kg		0	1	38	24	120	0,57	0,7	229	3	0,17	1,0	44,42	3	0,01	44	2	
1 €/kg		0	1	148	87	83	3,00	0,2	229	4	0,71	0,2	53,51	3	0,01	54	2	

Tableaux 3&4 (suite)											
(Type de simulation effectué) l'organisation logistique résulte de :	Quantité mensuelle expédiée par la firme	Valeur H.T. au kg du produit	Distance totale réelle parcourue (km route)	Emissions kg CO2-e / tonne produit	"Option rail" Emissions kg CO2-e / tonne produit	Emissions kg CO2-e / tonne produit envoi T1	"Option rail" Emissions kg CO2-e / tonne produit envoi T1	Coût de distrib moyen TOTAL par produit	Coût de distrib plate-forme "Grand client" par produit	Nbre de liaisons fer si "option rail"	Coût additionnel par tonne produit si "option rail" (+24h)
la recherche de l'optimum du coût de distribution pour le chargeur avec une AUGMENTATION de 100% des PRIX DU CARBURANT (par rapport au scénario de référence)	50 000 tonnes	10 €/kg	340	30	12	895708	102955	0,06	0,03	1	4,96
		1 €/kg	273	25	7	895708	102955	0,04	0,02	1	0,50
	5 000 tonnes	100 €/kg	505	47	29	113061	33785	0,36	0,23	1	49,64
		10 €/kg	376	34	17	89571	10295	0,14	0,08	1	4,96
		1 €/kg	335	31	13	89571	10295	0,08	0,03	1	0,50
		600 €/kg	505	55	38	15004	7077	1,88	1,21	1	297,83
	500 tonnes	100 €/kg	507	55	38	15004	7077	0,72	0,46	1	49,64
		10 €/kg	488	45	28	11306	3379	0,36	0,19	1	4,96
		1 €/kg	466	37	19	11306	3379	0,21	0,07	1	0,50
		600 €/kg	505	55	38	1500	708	3,29	2,10	1	297,83
	50 tonnes	100 €/kg	497	54	37	1500	708	1,81	1,05	1	49,64
		10 €/kg	474	52	35	1500	708	1,00	0,42	1	4,96
	1 €/kg	454	51	33	1500	708	0,65	0,17	1	0,50	
la recherche de la STRUCTURE de distribution qui minimise les émissions de GES; en laissant le modèle calculer le cadencement des envois optimum pour le chargeur	50 000 tonnes	10 €/kg	333	29	11	895708	102955	0,06	0,03	1	4,96
		1 €/kg	273	25	7	895708	102955	0,04	0,01	1	0,50
	5 000 tonnes	100 €/kg	386	42	24	89571	10295	0,34	0,22	1	49,64
		10 €/kg	362	33	15	89571	10295	0,12	0,07	1	4,96
		1 €/kg	333	31	13	89571	10295	0,07	0,03	1	0,50
		600 €/kg	453	51	33	15004	7077	1,92	1,13	1	297,83
	500 tonnes	100 €/kg	453	51	33	15004	7077	0,74	0,38	1	49,64
		10 €/kg	462	43	26	11306	3379	0,34	0,16	1	4,96
		1 €/kg	362	33	15	8957	1030	0,20	0,07	1	0,50
		600 €/kg	453	51	33	1500	708	3,51	1,83	1	297,83
	50 tonnes	100 €/kg	453	51	33	1500	708	1,86	0,91	1	49,64
		10 €/kg	453	51	33	1500	708	0,98	0,38	1	4,96
	1 €/kg	462	43	26	1131	338	0,62	0,16	1	0,50	

Tableaux 5&6																			
(Type de simulation effectué) l'organisation logistique résulte de :	Quantité mensuelle expédiée par la firme	Valeur H.T. au kg du produit	"Grands" Livraison directe (oui:1; non:0)	"Petits" Structure 2 niveaux (oui:1; non:0) sinon 3 niveaux	"Grands" Stocks (en jours dans le réseau)+ plates-formes clients	"Petits" Stocks (en jours dans le réseau)	Nbre centres distrib C1 (nbre centres intermédiaires)	Poids envoi T1 (tonnes)	Fréquence envoi F1 (fréquence)	D1 (km) Distance orthodromique	Type Transport Envoi T1 (2: messagerie; 3: réseau; 4:lot; 5:complet)	Poids envoi Tb (tonnes)	Fréquence envoi Fb (fréquence)	Db (km) Distance orthodromique	Type Transport Envoi Tb (2: messagerie; 3:réseau; 4:lot; 5:complet)	Poids envoi Ts (tonnes)	DS (km) Distance orthodromique	Type Transport Envoi Ts (0: tournées de distribution; 2: messagerie; 3:réseau; 4:lot)	
la recherche de la STRUCTURE de distribution qui minimise les émissions de GES; en forçant le modèle à doubler la taille optimale (économiquement pour le chargeur) de tous les envois (division par 2 du cadencement des envois optimum pour le chargeur)	50 000 tonnes	10 €/kg	1	1	5	2	120	25,00	15,0	229	5	34,56	5,0	44,42	5	5,76	44	4	
		1 €/kg	1	1	6	2	120	25,00	15,0	229	5	50,00	3,5	44,42	5	5,76	44	4	
	5 000 tonnes	100 €/kg	0	1	7	4	50	18,00	5,0	229	5	3,46	5,0	68,82	4	0,58	69	3	
		10 €/kg	0	1	14	9	120	20,13	1,9	229	5	5,81	3,0	44,42	4	0,58	44	3	
		1 €/kg	1	1	32	11	120	25,00	1,5	229	5	24,34	0,7	44,42	5	0,58	44	3	
	500 tonnes	600 €/kg	0	1	7	4	30	3,00	5,0	229	4	0,35	5,0	88,84	3	0,06	89	2	
		100 €/kg	0	1	7	4	30	3,00	5,0	229	4	0,37	4,7	88,84	3	0,06	89	2	
		10 €/kg	0	1	32	20	120	4,80	0,8	229	4	1,39	1,2	44,42	3	0,06	44	2	
	50 tonnes	1 €/kg	0	1	134	83	120	20,13	0,2	229	5	5,81	0,3	44,42	4	0,06	44	2	
		600 €/kg	0	1	7	4	120	0,09	4,2	229	2	0,03	5,0	44,42	2	0,01	44	2	
		100 €/kg	0	1	19	12	120	0,27	1,4	229	3	0,08	2,2	44,42	2	0,01	44	2	
		10 €/kg	0	1	59	26	22	3,00	0,7	229	4	0,38	0,5	102,79	3	0,01	103	2	
1 €/kg		0	1	319	199	120	4,80	0,1	229	4	1,39	0,1	44,42	3	0,01	44	2		
la recherche de la STRUCTURE de distribution qui minimise les émissions de GES; en forçant le modèle à tripler la taille optimale (économiquement pour le chargeur) de tous les envois (division par 3 du cadencement des envois optimum pour le chargeur)	50 000 tonnes	10 €/kg	1	1	6	2	120	25,00	15,0	229	5	51,84	3,3	44,42	5	5,76	44	4	
		1 €/kg	1	1	8	2	120	25,00	15,0	229	5	75,00	2,3	44,42	5	5,76	44	4	
	5 000 tonnes	100 €/kg	0	1	10	5	75	18,01	3,3	229	5	5,18	3,3	56,20	4	0,58	56	3	
		10 €/kg	0	1	18	11	120	25,00	1,5	229	5	8,71	2,0	44,42	4	0,58	44	3	
		1 €/kg	1	1	42	11	120	25,00	1,5	229	5	36,51	0,5	44,42	5	0,58	44	3	
	500 tonnes	600 €/kg	0	1	10	5	45	3,00	3,3	229	4	0,52	3,3	72,55	3	0,06	73	2	
		100 €/kg	0	1	10	5	47	3,00	3,2	229	4	0,53	3,3	71,23	3	0,06	71	2	
		10 €/kg	0	1	38	17	24	18,00	1,0	229	5	2,35	0,7	98,40	3	0,06	98	2	
	50 tonnes	1 €/kg	0	1	179	103	120	25,00	0,2	229	5	8,71	0,2	44,42	4	0,06	44	2	
		600 €/kg	0	1	11	6	120	0,13	2,8	229	3	0,05	3,3	44,42	2	0,01	44	2	
		100 €/kg	0	1	27	17	120	0,41	0,9	229	3	0,12	1,5	44,42	3	0,01	44	2	
		10 €/kg	0	1	97	51	47	3,00	0,3	229	4	0,53	0,3	71,23	3	0,01	71	2	
1 €/kg		0	1	375	171	24	18,00	0,1	229	5	2,35	0,1	98,40	3	0,01	98	2		

Tableaux 5&6 (suite)											
(Type de simulation effectué) l'organisation logistique résulte de :	Quantité mensuelle expédiée par la firme	Valeur H.T. au kg du produit	Distance totale réelle parcourue (km route)	Emissions kg CO2-e / tonne produit	"Option rail" Emissions kg CO2-e / tonne produit	Emissions kg CO2-e / tonne produit envoi T1	"Option rail" Emissions kg CO2-e / tonne produit envoi T1	Coût de distrib moyen TOTAL par produit	Coût de distrib plate-forme "Grand client" par produit	Nbre de liaisons fer si "option rail"	Coût additionnel par tonne produit si "option rail" (+24h)
la recherche de la STRUCTURE de distribution qui minimise les émissions de GES; en forçant le modèle à doubler la taille optimale (économiquement pour le chargeur) de tous les envois (division par 2 du cadencement des envois optimum pour le chargeur)	50 000 tonnes	10 €/kg	273	25	7	895708	102955	0,07	0,04	1	4,96
		1 €/kg	273	25	7	895708	102955	0,04	0,01	1	0,50
	5 000 tonnes	100 €/kg	358	33	15	89571	10295	0,51	0,34	1	49,64
		10 €/kg	333	31	13	89571	10295	0,15	0,08	1	4,96
		1 €/kg	273	26	9	89571	10295	0,07	0,03	1	0,50
	500 tonnes	600 €/kg	498	46	29	11306	3379	2,89	1,98	1	297,83
		100 €/kg	498	46	29	11306	3379	0,76	0,49	1	49,64
		10 €/kg	453	42	25	11306	3379	0,39	0,19	1	4,96
		1 €/kg	333	31	13	8957	1030	0,22	0,08	1	0,50
	50 tonnes	600 €/kg	453	51	33	1500	708	4,19	2,41	1	297,83
	100 €/kg	453	51	33	1500	708	2,10	1,06	1	49,64	
	10 €/kg	512	48	30	1131	338	1,06	0,51	1	4,96	
	1 €/kg	453	42	25	1131	338	0,66	0,19	1	0,50	
la recherche de la STRUCTURE de distribution qui minimise les émissions de GES; en forçant le modèle à tripler la taille optimale (économiquement pour le chargeur) de tous les envois (division par 3 du cadencement des envois optimum pour le chargeur)	50 000 tonnes	10 €/kg	273	25	7	895708	102955	0,08	0,05	1	4,96
		1 €/kg	273	25	7	895708	102955	0,04	0,01	1	0,50
	5 000 tonnes	100 €/kg	345	32	14	89571	10295	0,69	0,48	1	49,64
		10 €/kg	333	31	13	89571	10295	0,17	0,10	1	4,96
		1 €/kg	273	26	9	89571	10295	0,08	0,04	1	0,50
	500 tonnes	600 €/kg	481	45	27	11306	3379	4,01	2,83	1	297,83
		100 €/kg	480	45	27	11306	3379	0,91	0,59	1	49,64
		10 €/kg	387	42	24	8957	1030	0,43	0,26	1	4,96
		1 €/kg	333	31	13	8957	1030	0,24	0,10	1	0,50
	50 tonnes	600 €/kg	453	51	33	1500	708	5,21	3,18	1	297,83
	100 €/kg	453	51	33	1500	708	2,51	1,32	1	49,64	
	10 €/kg	480	45	27	1131	338	1,20	0,59	1	4,96	
	1 €/kg	387	42	24	896	103	0,76	0,26	1	0,50	

