

TABLE DE MATIERES

CHAPITRE 1. INTRODUCTION GENERALE	9
1.1 Le Contexte.....	9
1.2 Objectifs de la recherche et méthodologie	10
1.2.1 Objectifs	10
1.2.2 Méthodologie	11
1.3 Organisation du mémoire	13
CHAPITRE 2. REPENSER L'ORGANISATION LOGISTIQUE POUR DEPASSER L'ANTAGONISME ACTUEL	17
2.1 Mutations de la logistique et développement du transport de marchandises	18
2.1.1 Quel est le rôle de la logistique dans l'économie présente?	18
2.1.2 Définition et activités de la logistique	21
2.1.3 Accroissement du transport des marchandises par suite de déstabilisation logistique par l'amont et l'aval	29
2.1.4 Efficacité actuelle du transport routier de marchandises	33
2.1.5 Nécessité d'une nouvelle organisation logistique pour améliorer le transport terrestre des marchandises	36
2.2 La mutualisation logistique : une nouvelle démarche de massification des flux	37
2.2.1 Etat de l'art sur les démarches existantes de consolidation des flux	38
2.2.2 Définition de la mutualisation logistique	50
2.3 Terrain d'étude : la grande distribution en France	58
2.3.1 Externalisation des fonctions logistiques	61
2.3.2 Centralisation des stocks	63
2.4 Conclusion	65
CHAPITRE 3. LOGISTIQUE DURABLE : CONTRIBUTION A LA MINIMISATION DES EMISSIONS DE GES.....	67
3.1 Le développement durable	68
3.1.1 Définition générale.....	68
3.1.2 Accent sur les problèmes environnementaux	70
3.2 Interactions du développement durable et de la logistique : la logistique durable	76
3.2.1 La logistique durable	76
3.2.2 Transport routier de marchandises : son développement est-il durable ?.....	78
3.2.3 Les émissions de CO ₂ liées au transport terrestre de marchandises	84
3.2.4 Les possibles solutions pour réduire les émissions de CO ₂ du transport routier	86
3.3 Conclusion	89
CHAPITRE 4. MODELISATION DES EMISSIONS DE CO₂ DU TRANSPORT POUR LA CREATION DE MODELES D'OPTIMISATION LOGISTIQUE.....	91
4.1 Modélisation des émissions de CO ₂ des moyens de transport de marchandises.....	92

4.1.1	Méthodologies actuelles pour estimer les émissions de CO ₂ des transports routiers et ferroviaires ..	93
4.1.2	Modélisation du facteur des émissions de CO ₂ de transport routier.....	97
4.1.3	Modélisation du facteur des émissions de CO ₂ du transport ferroviaire	104
4.2	Modélisation de coûts logistiques	109
4.2.1	Coût de transport	109
4.2.2	Coût des stocks	113
4.2.3	Autres composants de coûts logistiques	116
4.3	Création des modèles d'optimisation minimisant les émissions de CO₂ du transport de marchandises	117
4.3.1	Modèles existants pour le transport de marchandises	118
4.3.2	Intération de la fonction d'émissions de CO ₂ aux modèles du TDNDP.....	133
4.3.3	Création d'un modèle d'aide à la décision pour définir un réseau logistique minimisant une fonction d'émission	137
4.3.4	Problème de tournée de véhicules	148
4.4	Conclusion	157

CHAPITRE 5. POTENTIEL DE MUTUALISATION ENTRE LES PLUS GRANDS FOURNISSEURS DE LA GRANDE DISTRIBUTION EN FRANCE..... 161

5.1	Mutualiser des chaines logistiques : quels acteurs et quels objectifs	162
5.1.1	Contexte du projet	162
5.1.2	Objectifs scientifiques et du cas	163
5.1.3	Périmètre et méthodologie	164
5.2	Construction de la base de données des réseaux de distribution et réduction de la taille du problème	165
5.2.1	Construction de la base de données des 100 premiers fournisseurs communs de deux enseignes de la grande distribution.....	165
5.2.2	Taille du problème et hypothèses de sa réduction.....	166
5.3	Mise en place du modèle de réseaux logistiques mutualisés entre des fournisseurs de la grande distribution	169
5.3.1	Principes de modélisation pour la mutualisation.....	170
5.3.2	Modélisation	171
5.4	Résultats et discussions.....	178
5.4.1	Transport routier	179
5.4.2	Transport conjoint routier et ferroviaire.....	181
5.4.3	Evaluation économique des solutions optimisées par les émissions	183
5.4.4	Optimum de Pareto coût/émissions en transport conjoint	185
5.5	Conclusion	188

CHAPITRE 6. MUTUALISATION ENTRE DES PME FOURNISSEURS DE LA GRANDE DISTRIBUTION : LE CAS DE L'ALIMENTAIRE DANS L'OUEST DE LA FRANCE 191

6.1	Les problématiques logistiques spécifiques aux PME fournisseurs de la grande distribution	193
6.2	Méthodologie et modélisation des scénarios de mutualisation	196
6.2.1	Définition du périmètre de l'étude et préparation de la base de données	197
6.2.2	Valorisation des schémas logistiques actuels de l'étude	200
6.2.3	Mise en place des critères d'évaluation.....	205
6.2.4	Présentation des différents scénarios de mutualisation et modélisation	206

6.3 Résultats et discussions.....	231
6.3.1 Dimension environnementale.....	231
6.3.2 Dimension économique.....	232
6.3.3 Synthèse des résultats.....	233
6.3.4 Discussions	234
6.4 Conclusion	235
CHAPITRE 7. CONCLUSION GENERALE : APPORTS, LIMITES ET PERSPECTIVES DE LA MUTUALISATION.....	237
7.1 Récapitulatif des apports de ce travail.....	237
7.1.1 Mise en place des principes de la mutualisation	237
7.1.2 Objectif de la minimisation des émissions du transport et création de nouveaux modèles d'optimisation.....	239
7.1.3 Etudes de pilotes de mutualisation logistique	240
7.2 Limites principales.....	242
7.2.1 Périmètre des émissions	242
7.2.2 Méthodes de résolution et contraintes complémentaires	243
7.3 Perspectives et élargissement de la réflexion pour la mise en œuvre de la mutualisation	244
7.3.1 Intégration des systèmes d'informations	244
7.3.2 Construction de coalitions.....	245
7.3.3 Règles d'engagement et répartition équitable des gains.....	246
7.4 La mutualisation : une contribution à une logistique plus partagée et soutenable	246
8. BIBLIOGRAPHIES.....	249
9. ANNEXES	259
Annexe 1. Les cartographies des flux avant et après mutualisation (9 études de cas)	259
Annexe 2 : Exemple du questionnaire réalisé sur la plateforme de Carrefour au Mans (pour l'étude de cas des PME fournisseurs)	265
Annexe 3 : Caractéristiques des flux de deux études réalisées	267
Annexe 4 : Publications acceptées et proceedings	269

TABLE DES ILLUSTRATIONS

ENCADRE 1 : DIFFERENCE ENTRE LA CONSOLIDATION D'ENVOIS ET MULTI-DROP -----	40
ENCADRE 2 : EXEMPLE DE L'EVOLUTION SUR LA CENTRALISATION DES STOCKS : YOPLAIT PENDANT LES ANNEES 1960-1995 (DORNIER, 1997)-----	64
ENCADRE 3 : DIVERS FACTEURS D'EMISSIONS EN FRANCE: LE « BILAN CARBONE »-----	74
ENCADRE 4 : PRESENTATION DU PROJET EUROPEEN « COPERT » -----	98
ENCADRE 5 : PRESENTATION DE LA FEEF-----	196

FIGURE 2.1 : ACTIVITE ECONOMIQUE ET TRANSPORT DE FRET EN FRANCE (1962=BASE 100) SOURCE : (MEEDDAT, 2008)	20
FIGURE 2.2 : TYPE DE RELATION D'UNE CHAINE LOGISTIQUE (MENTZER ET AL., 2001).....	22
FIGURE 2.3 : EXEMPLE DE LA STRUCTURE DU SUPPLY CHAIN NETWORK (LAMBERT ET COOPER, 2000).....	23
FIGURE 2.4 : L'EVOLUTION D'INTEGRATION DU SCM (HESSE ET RODRIGUE, 2004)	28
FIGURE 2.5 : EXEMPLE DE LA CONSOLIDATION DES STOCKS D'UN FOURNISSEUR PAR TRANSPORT DIRECT	40
FIGURE 2.6 : EXEMPLE DE LA CONSOLIDATION EN MOYEN DE TRANSPORT (TOURNEE DE VEHICULES).....	42
FIGURE 2.7 : EXEMPLE DU SYSTEME HUB-AND-SPOKE	45
FIGURE 2.8 : EXEMPLE DU SYSTEME DE CROSS-DOCKING.....	48
FIGURE 2.9 : EXEMPLE DU SYSTEME DE MERGE-IN-TRANSIT	49
FIGURE 2.10 : ACTIVITES PRINCIPALES DU MANAGEMENT DE LA MUTUALISATION EN TRANSPORT	56
FIGURE 2.11 : EXEMPLE D'APPLICATION DES PRINCIPES DE LA MUTUALISATION DES RESEAUX LOGISTIQUES	57
FIGURE 2.12 : CHIFFRES D'AFFAIRES DES DISTRIBUTEURS ALIMENTAIRES FRANÇAIS (HT MILLIARDS D'EUROS) (SOURCE : FCD, CHIFFRES 2010)	59
FIGURE 2.13 : EXEMPLE D'UNE CHAINE LOGISTIQUE ALIMENTAIRE EN FRANCE (DE FOURNISSEUR A DISTRIBUTEUR) (BALLOT ET FONTANE, 2010)	61
FIGURE 2.14 : DEGRE D'EXTERNALISATION LOGISTIQUE EN EUROPE (DATA ISSUS DE DATAMONITOR PRESENTES DANS (BECKER, 2003))	62
FIGURE 3.1 : LES TROIS PILIERS DU DEVELOPPEMENT DURABLE.....	69
FIGURE 3.2 : EVOLUTION DE LA CONSOMMATION D'ENERGIE PRIMAIRE CORRIGEE DU CLIMAT (EN MTEP) (SOES, 2009)	71
FIGURE 3.3 : EVOLUTION DU PRIX DES ENERGIES PREMIERES CONSOMMEES PAR L'INDUSTRIE EN FRANCE (SOURCE : INSEE)	71
FIGURE 3.4 : EMISSIONS DE CO ₂ TOTALES ET DUES A LA COMBUSTION D'ENERGIE DU MONDE ET DE LA FRANCE (1990 = BASE 100) (SOURCE : AIE ET CDIAC)	73
FIGURE 3.5 : CONCEPT DE LA LOGISTIQUE DURABLE	76
FIGURE 3.6 : GSCM DANS UNE CHAINE LOGISTIQUE TRADITIONNELLE (BLOEMHOF-RUWAARD ET AL., 1995).....	77
FIGURE 3.7 : TRANSPORTS INTERIEURS TERRESTRES DE MARCHANDISES PAR MODE (1990-2008 EN FRANCE) (SOURCE SOES, COMPTE DES TRANSPORTS).....	79
FIGURE 3.8 : EFFICACITE ENVIRONNEMENTALE PAR MODE DE TRANSPORT DE MARCHANDISES EN FRANCE (TRAJETS NON VIDES AVEC CHARGE MOYENNE D'APRES «MODULE GES TRANSPORTS - CALCUL DES EMISSIONS», EPE/ADEME, OCTOBRE 2005)	83
FIGURE 3.9 : CONSOMMATION D'ENERGIE DE TRACTION SELON LE MODE DE TRANSPORT (1980 = BASE 100)	84
FIGURE 3.10 : EMISSIONS DE CO ₂ DUES A L'ENERGIE AVEC CORRECTION CLIMATIQUE EN FRANCE METROPOLITAINE (EN MILLIONS DE TONNES DE CO ₂) (SOURCE : SOES 2010).....	86
FIGURE 3.11 : CHEMINS VERS L'OBJECTIF DE REDUIRE LES EMISSIONS DE CO ₂ LIEES AU TRANSPORT DE FRET	87
FIGURE 4.1 : LES EMISSIONS DE CO ₂ EN FONCTION DE LA VITESSE D'UN CAMION ROULANT A VIDE	101
FIGURE 4.2 : COMPARAISON DES EMISSIONS DES MOYENS DE TRANSPORT	108

FIGURE 4.3 : ANALYSE DU COUT DE TRANSPORT EN FONCTION DU NOMBRE DE PALETTES TRANSPORTÉES	110
FIGURE 4.4 : COUT DE TRANSPORT D'UN WAGON PAR KM (BAREME GENERAL DE TRANSPORT AVEC LES WAGONS A PLUS DE 2 ESSIEUX OU A BOGIES DE LA FRET SNCF 2009)	111
FIGURE 4.5 : DETERMINATION DE LA COURBE TARIFAIRES DE TRAIN COMPLET HYPOTHETIQUE	112
FIGURE 4.6 : EXEMPLE DES RESEAUX DE DISTRIBUTION DIRECTE OU AVEC CENTRE DE MUTUALISATION	114
FIGURE 4.7 : EXEMPLE DU RESEAU O-D	120
FIGURE 4.8 : EXEMPLE DES RESEAUX O-H-D ET O-H-H-D	124
FIGURE 4.9 : EXEMPLE D'UNE FONCTION LINEAIRE CONCAVE PAR MORCEAUX	134
FIGURE 4.10 : EXEMPLE DE LA FONCTION LINEAIRE PAR MORCEAUX DISCONTINUS	136
FIGURE 4.11 : DEFINITION DES PARAMETRES DE LA FONCTION LINEAIRE PAR MORCEAUX $G(X)$	138
FIGURE 4.12 : EXEMPLE DES SCHEMAS LOGISTIQUES ACTUELS ET APRES MUTUALISATION ..	142
FIGURE 5.1 : METHODOLOGIQUE DE L'ETUDE	164
FIGURE 5.2 : DECOMPOSITION DE LA BASE DE DONNEES ET EXEMPLES DE FOURNISSEURS DES FAMILLES	169
FIGURE 5.3 : EXEMPLE DU RESEAU MUTUALISE ENTRE LES FOURNISSEURS A FORT VOLUME AU NIVEAU NATIONAL	171
FIGURE 5.4 : ILLUSTRATION DE LA SIMPLIFICATION DES SEGMENTS DE LA FONCTION LINEAIRE DISCONTINUE ET DES COUPES SUPPLEMENTAIRES SUR LA TAILLE DE FLUX SUR L'ARC (TRANSPORT ROUTIER)	177
FIGURE 5.5 : EXEMPLE DU RESEAU DE TRANSPORT ROUTIER AVANT ET APRES MUTUALISATION (GROUPE C DE DPH)	180
FIGURE 5.6 : EXEMPLE DU RESEAU DE TRANSPORT CONJOINT ROUTIER ET FERROVIAIRE AVANT ET APRES MUTUALISATION (GROUPE C DE DPH)	182
FIGURE 5.7 : EXEMPLE DE LA FRONTIERE D'EFFICIENCE DE PARETO ECOLOGIQUE/ECONOMIQUE SELON L'EVOLUTION HYPOTHETIQUE DU PRIX DES TRANSPORTS (ROUTIER, FERROVIAIRE) (GROUPE C DE DPH)	187
FIGURE 6.1 : MAJORS PROBLEMATIQUES DE LA DISTRIBUTION	194
FIGURE 6.2 : METHODOLOGIE DE L'ETUDE DE CAS	197
FIGURE 6.3 : REPARTITION DES FOURNISSEURS ET DES FLUX DE LA BASE	198
FIGURE 6.4 : LOCALISATION DES FOURNISSEURS (CERCLE) ET DES PLATEFORMES DU DISTRIBUTEUR (TRIANGLE)	199
FIGURE 6.5 : EXEMPLES DE CONTENU DES CAMIONS EN ARRIVE A QUAI	201
FIGURE 6.6 : RESEAU LOGISTIQUE AVEC CENTRE DE MUTUALISATION ET LIVRAISON DIRECTE EN CAMIONS COMPLETS DANS L'AMONT ET L'aval	210
FIGURE 6.7 : PROPOSITION DES 12 CANDIDATS POUR LES CENTRES DE MUTUALISATION	212
FIGURE 6.8 : EMISSIONS DE CO ₂ ET COUT DU TRANSPORT PAR RAPPORT AU NOMBRE DE CENTRES DE MUTUALISATION (SCENARIO 1 A 33 SEMAINES)	216
FIGURE 6.9 : EXEMPLE D'IMPLANTATION OPTIMISEE POUR 4 ENTREPOTS (OPTIMISATION DES EMISSIONS DU SCENARIO 1)	217
FIGURE 6.10 : PLACE DES CENTRES DE CROSS-DOCKING MUTUALISES	218
FIGURE 6.11 : DEFINITION DES PARAMETRES DE LA FONCTION LINEAIRE PAR MORCEAUX $G(X)$	219
FIGURE 6.12 : ILLUSTRATION DE LA REDUCTION DU NOMBRE DES SEGMENTS DE LA FONCTION LINEAIRE DISCONTINUE ET DES BORNES SUR LA TAILLE DE FLUX	222
FIGURE 6.13 : EMISSIONS DE CO ₂ ET COUT DU TRANSPORT PAR RAPPORT AU NOMBRE DE CDM (1 SEMAINE)	223
FIGURE 6.14 : ENTREPOT MUTUALISE SERVI PAR LIVRAISONS DIRECTES ET TOURNEES	225
FIGURE 6.15 : MUTUALISATION DE MOYEN DE TRANSPORT	230
FIGURE 6.16 : TRADE-OFF ENTRE LES EMISSIONS DE CO ₂ ET LES COUTS LOGISTIQUES	233
 TABLEAU 2.1 : ACTIVITES PRINCIPALES DU SCM (MENTZER ET AL., 2001)	26
TABLEAU 2.2 : STRATEGIES INDUSTRIELLES ET LEURS IMPACTS LOGISTIQUES ET SUR LE TRANSPORT (D'APRES LE TABLEAU 10 DANS (DORNIER, 1997))	30

TABLEAU 2.3 : STRATEGIES DE DISTRIBUTEURS ET LES IMPACTS LOGISTIQUES ET SUR TRANSPORT (D'APRES LE TABLEAU 15 DANS (DORNIER, 1997))	32
TABLEAU 2.4 : L'ETAT DE L'ART DES MESURES DE LA CONSOLIDATION DE FRET	39
TABLEAU 2.5 : DEFINITION DES TROIS ORGANISATIONS LOGISTIQUES PRINCIPALES DU COUNCIL OF SUPPLY CHAIN MANAGEMENT PROFESSIONALS EN 2010.....	44
TABLEAU 3.1 : TRANSPORT DE MARCHANDISES A L'HORIZON 2030 (D'APRES (SOES, 2007), SANS CABOTAGE MARITIME).....	80
TABLEAU 4.1 : COMPARAISON DES TROIS METHODES POUR DETERMINER LE FACTEUR D'EMISSIONS DE CO ₂ LIEES AU TRANSPORT ROUTIER	94
TABLEAU 4.2 : COMPLEXITE DES MODELES DU PROBLEME HMP (NON CAPACITE ET NON COUT FIXE SUR HUB).....	132
TABLEAU 4.3 : TROIS MODELISATIONS DE LA FONCTION LINEAIRE PAR MORCEAUX (CROXTON ET AL., 2003A).....	136
TABLEAU 5.1 : CARACTERISTIQUES DES FLUX DE BASE DE DONNEES ETUDIEE	166
TABLEAU 5.2 : NOMBRE DE FOURNISSEURS DANS LES GROUPES DES FAMILLES DE PRODUIT	169
TABLEAU 5.3 : NOMBRE DE VARIABLES DU TRANSPORT ROUTIER (AVANT ET APRES APPLICATION DU RAYON DE REGROUPEMENT)	177
TABLEAU 5.4 : EMISSIONS DE TRANSPORT ROUTIER EN UNE SEMAINE (TONNE CO ₂)	179
TABLEAU 5.5 : RESULTATS SUR TAUX DE CHARGEMENT, KILOMETRES PARCOURUS ET FREQUENCE DE LIVRAISON	181
TABLEAU 5.6 : EMISSIONS DE TRANSPORT CONJOINT (ROUTIER ET FERROVIAIRE) EN UNE SEMAINE (TONNE CO ₂)	182
TABLEAU 5.7 : COUT DE TRANSPORT DES SCHEMAS APRES MUTUALISATION ET EN OPTIMISANT LES EMISSIONS DE CO ₂ AU TRANSPORT (TRANSPORT ROUTIER SEUL)	184
TABLEAU 5.8 : COUT DE TRANSPORT DES SCHEMAS APRES MUTUALISATION ET EN OPTIMISANT LES EMISSIONS DE CO ₂ AU TRANSPORT (TRANSPORT CONJOINT : ROUTIER ET FERROVIAIRE).....	185
TABLEAU 5.9 : EMISSIONS DE CO ₂ DES SCHEMAS APRES MUTUALISATION ET EN OPTIMISANT LE COUT DE TRANSPORT (TRANSPORT ROUTIER SEUL)	186
TABLEAU 6.1 : PME FRANCAISES DANS LA GRANDE DISTRIBUTION ALIMENTAIRE NATIONALE	192
TABLEAU 6.2 : ORGANISATIONS LOGISTIQUES IDENTIFIEES PAR LES ENTRETIENS AVEC LES CHAUFFEURS ET LES COEFFICIENTS DE CHARGEMENT ASSOCIES	201
TABLEAU 6.3 : ESTIMATION DE LA PERFORMANCE DES SCHEMAS LOGISTIQUES ACTUELS SELON DEUX HYPOTHESES	205
TABLEAU 6.4 : POSSIBILITES DE LA MUTUALISATION AUX PME REGIONALES DE LA GRANDE DISTRIBUTION	207
TABLEAU 6.5 : RESULTATS ENVIRONNEMENTAUX (SOMME DES EMISSIONS DE CO ₂ DE TRANSPORT DE 33 SEMAINES)	231
TABLEAU 6.6 : LISTE DES RESULTATS ECONOMIQUES (SUR L'ENSEMBLE DES FLUX DE 33 SEMAINES).....	232
TABLEAU 6.7 : RESULTATS DES 4 SCENARIOS D'OPTIMISATION ET DES REFERENCES	233

Chapitre 1. Introduction générale

La logistique et les transports ont accompli des progrès considérables si l'on regarde leur performance actuelle en termes de rapidité, de disponibilité des produits, ou de coût pour ne citer que quelques facteurs d'évaluation. Les technologies utilisées par les moyens de transport et l'organisation qui s'est développée avec les chaînes logistiques et l'émergence de leurs prestataires ont largement contribué à l'obtention de ce niveau de performance. Pour autant, ce développement présente aujourd'hui des aspects négatifs tels que la congestion croissante des infrastructures routières, l'utilisation importante d'énergie non renouvelable avec son corolaire d'émissions de gaz à effet de serre. C'est dans ce contexte porteur d'antagonismes que cette thèse va montrer que la conception de schémas logistiques mutualisés propose une solution qui consomme moins de ressources tout en offrant un niveau de service identique.

1.1 Le Contexte

Aujourd'hui les exigences de disponibilité des biens conjuguées à la réduction drastique des niveaux de stocks dans la chaîne logistique ont conduit à multiplier les solutions de transport et les moyens engagés à cet effet. Pendant longtemps, la disponibilité de l'offre de transport et son prix abordable ont accentué cette situation. Néanmoins, si l'on peut faire l'hypothèse que les exigences de service resteront d'actualité à court et à moyen terme, la tendance montre une saturation possible des infrastructures et une évolution à la hausse du coût du transport qui rendra moins viable les solutions actuelles. Mais plus encore, il faut s'interroger sur la compatibilité de cette tension des flux nécessaire à une économie de la disponibilité avec la préservation de l'environnement notamment en termes d'émissions de CO₂. Ces éléments antagonistes devraient donc conduire à une remise en cause profonde des pratiques logistiques actuelles. Plus particulièrement l'hypothèse qui est faite ici est que le caractère relativement parcellisé de ces activités (réseau d'approvisionnement ou de distribution presté mais généralement dédié) conduit à une sous optimisation de la logistique préjudiciable à sa performance globale et environnementale. Ce point sera argumenté à travers l'analyse de la performance actuelle et mettra en évidence la nécessité de nouvelles organisations logistiques. C'est pourquoi, il est proposé ici de caractériser et d'étudier la

mutualisation qui pourra être une solution pour dépasser ces contraintes. C'est à partir de ce contexte que ce travail de recherche a été mené.

Ce projet de recherche a retenu l'attention de la région Ile-de-France qui à travers le programme de recherche R2DS¹ (Réseau de Recherche sur le Développement Soutenable) a financé cette thèse. Ce travail a en outre rencontré l'intérêt d'acteurs des chaînes logistiques de la grande distribution. Deux collaborations ont été ainsi mises en œuvre avec l'Association du Club Déméter Environnement et Logistique² et la FEEF (Fédération des Entreprises et Entrepreneurs de France)³. Ces deux dernières collaborations ont permis de tester les hypothèses de la recherche sur des données réelles et à grande échelle.

1.2 Objectifs de la recherche et méthodologie

1.2.1 Objectifs

Le programme de recherche mené dans cette thèse a eu pour principal objectif de tester l'impact environnemental de la mutualisation et en complément d'éclairer certains enjeux économiques associés. Pour cela nous nous sommes appuyés sur la chaîne logistique de la grande distribution. Celle-ci possède des volumes importants, répartis sur l'ensemble du territoire et elle est sensible à son empreinte carbone du fait de sa proximité avec les consommateurs finaux. L'ambition de ce travail doctoral est donc de proposer une méthode d'évaluation scientifique de nouveaux schémas logistiques mutualisés, entre les acteurs de la *supply chain* des produits de grande consommation (industriels, distributeurs et prestataires logistiques). En ce sens, il permettra ainsi d'éclairer et de contribuer aux nécessaires mutations à venir en logistique. Pour ce faire, plusieurs objectifs doivent être atteints :

- Elaborer les principes de la mutualisation. En effet, les économies d'échelle et la consolidation sont des principes connus de longue date dans le transport. Il s'agira donc de mesurer leur portée réelle et d'indiquer en quoi les principes de mutualisation proposés en diffèrent. Ces principes ont pour but de préciser ce qui mutualisé et les conséquences qui en découlent. Parmi les activités logistiques, le transport a été principalement ciblé comme l'objet de l'étude en raison de son importance notamment en termes d'émissions.

¹ <http://www.r2ds-ile-de-france.com/>

² www.club-demeter.fr

³ <http://www.fef.org/>

- Quantifier les gains globaux atteignables lors de la mutualisation de schémas logistiques. Il est important de noter que le premier objectif de cette étude est la réduction des émissions de CO₂, pris comme élément environnemental de référence, pour sa contribution directe à l'effet de serre. A titre complémentaire, les coûts logistiques associés, et plus particulièrement ceux du transport, seront aussi étudiés à partir des schémas logistiques mutualisés. Ainsi, nous pourrons analyser le compromis émission/coût de ce type de solution logistique.

Il s'agit donc de démontrer le potentiel environnemental de la mutualisation sans pour autant négliger son effet, sur les coûts et ceci avec les deux principaux moyens du transport terrestre utilisables : les camions et les trains.

1.2.2 Méthodologie

Une des spécificités du Centre de Gestion Scientifique de l'Ecole des Mines de Paris est la méthodologie de recherche intervention développée depuis plus de trente ans (Moisdon, 1985), (Moisdon, 1997) et (David et Hatchuel, 2007). Celle-ci *a contrario* d'autres méthodes utilisées en sciences de gestion (approche hypothético-déductive par exemple) repose sur l'implication du ou des chercheurs dans la transformation de l'organisation par différentes techniques : formulation d'un modèle gestionnaire ou plus précisément ici d'un modèle d'aide à la décision (Roy, 1985) et (Ballot, 2009). Ceci signifie qu'il existe une organisation identifiée et une concordance entre le périmètre de l'action et la structure organisationnelle. Dans le cas de la chaîne logistique et plus encore dans la cadre de la recherche sur la mutualisation de ces chaînes, l'enjeu est d'explorer le fonctionnement d'une organisation fruit d'un partenariat entre de multiples acteurs et encore inexistante. Pour contourner cette difficulté, il a été construit deux partenariats avec deux associations d'industriels de la grande distribution : le Club Déméter et la FEEF. Il s'agit donc d'une recherche intervention un peu particulière qui vise à explorer et à participer à l'émergence de nouvelles organisations avec le concours d'organisations tierces mais au sein desquelles les acteurs sont représentés ou au moins une part significative d'entre eux. Cette problématique de la création de partenariat n'est pas développée ici mais pourrait faire l'objet d'une recherche ultérieure en s'appliquant notamment sur les travaux menés par Segrestin sur les partenariats d'exploration, voir (Segrestin, 2003) et (Segrestin, 2006).

Dans cette thèse, la méthodologie suivante a été mise en œuvre.

- Dans un premier temps, une analyse bibliographique a été réalisée afin de préciser les contraintes qui pèsent sur la chaîne logistique et plus particulièrement sur le transport et ses performances actuelles. En parallèle, il a été recherché les modèles existants pour représenter les émissions et en identifier les paramètres pertinents. Cette première étape a été menée afin de comprendre les problèmes et les contraintes actuels de la logistique pour définir les principes de mutualisation du transport à tester.
- Il a ensuite été construit un modèle mathématique qui permette de définir les schémas logistiques mutualisés et de les optimiser en minimisant les émissions de CO₂. A cette fin, il a fallu également élaborer les facteurs et les émissions des moyens de transport qui correspondent au périmètre de l'étude. En parallèle, une analyse a été nécessaire afin d'obtenir une « valorisation » de la situation actuelle de manière à pouvoir la comparer avec celle résultante de la mise en place des principes de mutualisation. Nous avons donc mené dans cette deuxième phase une analyse comparative.
- Finalement, l'« intervention » au sein des partenariats construits et mentionnées ci-dessus a permis de tester les principes élaborés à partir de la littérature et de l'analyse de l'existant. Préalablement, trois hypothèses ont été retenues dans les études : les possibilités de massification au niveau du transporteur ou du prestataire sont incluses dans les performances actuelles ; il ne doit pas y avoir de dégradation de la fréquence de livraison vers les plates-formes distributeur ; la capacité de chargement des moyens de transport est strictement respectée. Ces hypothèses ont été retenues afin d'avoir des résultats comparables et sans surestimer la performance de la mutualisation.

La validité des résultats d'une recherche-intervention fait souvent l'objet de critiques qui reposent sur deux arguments principaux : l'influence du contexte sur le chercheur-intervenant qui l'éloignerait d'une connaissance objective et la dérive vers la consultation qui l'éloignerait de la recherche.

Dans notre démarche de recherche intervention, nous n'avons pas eu besoin, d'une part, de négocier régulièrement le cahier des charges de notre recherche avec les mandants des études, pour préserver notre sujet de recherche et, d'autre part, nous n'avons pas été soumis à des

pressions de l'environnement professionnel sur notre objet d'étude. Cela se justifie principalement par le fait que les entités contractantes (par leur côté associatif) avaient un intérêt marqué pour montrer que la mutualisation logistique pouvait être une solution efficace pour réduire l'empreinte carbone (notamment le Club Demeter dont l'objectif est de mettre en œuvre des solutions opérationnelles destinées à maîtriser les impacts environnementaux).

Par ailleurs, (Plane, 2000) a souligné que la différence entre la recherche-intervention et le conseil est que les résultats de la recherche-intervention font l'objet de publications et d'une diffusion des connaissances au sein de conférences scientifiques. Or, notre travail doctoral a conduit à une publication dans *International Journal of Production Economics* (consigné en Annexe 4) et à des communications dans des congrès scientifiques (notamment l'obtention des prix « *The best research paper in Industrial Engineering* » et « *The Most Valuable Research Contribution Paper Award in Student Competition* » au congrès IESM 2009, la liste de ces communications est aussi consultable en Annexe 4). C'est pourquoi, nous pouvons aussi lever la deuxième limite qui pèse sur la méthodologie que nous avons retenue

1.3 Organisation du mémoire

Ce mémoire comporte en plus de cette introduction six chapitres qui sont organisés comme suit :

- Le chapitre 2 exposera les antagonismes actuels auxquels est soumise la logistique. Entre d'une part l'exigence de niveau de service et de réduction des stocks, qui se traduit par des fréquences de livraison élevées, et d'autre part la recherche d'utilisation et de saturation de moyens lourds. Cet exposé permettra de dresser le cadre théorique de la mutualisation et de différencier cette organisation des approches de consolidation traditionnelle confiée aux prestataires ou aux transporteurs ;
- Le chapitre 3 se propose de positionner les problèmes du transport de marchandises dans le cadre du développement durable et ainsi de définir l'objectif de cette étude : étudier la performance de la mutualisation logistique sur la minimisation des émissions de CO₂ ;

- Le chapitre 4 est consacré aux problèmes de la modélisation mathématique des facteurs d'émission des moyens de transport pour aboutir à des fonctions d'émissions, dont la part CO₂ sera détaillée. Il sera alors possible d'examiner comment ces fonctions peuvent être introduites dans les problèmes de transport au niveau de la conception de réseaux logistiques. C'est dans ce chapitre que les modèles d'optimisation seront examinés et qu'une optimisation des réseaux logistiques mutualisés sera proposée ;
- Le chapitre 5 porte sur un cas, où l'on étudie le potentiel de mutualisation des schémas logistiques des cent premiers fournisseurs de produits de grande consommation (DPH et épicerie) en volume expédié à travers leurs livraisons pour deux grands distributeurs français. Les sites des fournisseurs et les plateformes des distributeurs sont situés au niveau national. Cette partie donnera donc une estimation des gains possibles pour la grande distribution ;
- Le chapitre 6 propose une étude de cas concernant des PME, fournisseurs régionaux de la grande distribution, vers les plateformes d'une enseigne. Ce cas portera sur des flux régionaux et plus faibles que ceux du cas précédent. Il permet donc de tester l'intérêt de la mutualisation dans un contexte logistique différent. Quatre scénarios de mutualisation vont être mis en place et examinés par les modèles d'optimisation proposés ;
- Le chapitre 7 présente la conclusion générale de ce travail. Il a pour but de récapituler les apports ainsi que les limites du travail réalisé. Les perspectives ouvertes par les résultats suggèrent des prolongements possibles sur plusieurs plans : étendre les données du transport à d'autres constituants de la chaîne logistique, évaluer comment les gains et les coûts pourraient être partagés entre les acteurs, quels acteurs et quels processus permettraient d'aboutir à la mutualisation et comme cette organisation n'est pas suffisante pour atteindre le « Facteur 4 »⁴ quelles nouvelles organisations faut-il envisager en complément ou en substitution.

Comme l'indique le plan ci-dessus, après ce chapitre introductif, le prochain chapitre montrera le développement et les problèmes de la logistique aujourd'hui, puis discutera de la

⁴ L'expression Facteur 4 désigne un objectif ou un engagement écologique qui consiste à diviser par 4 les émissions de gaz à effet de serre d'un pays ou d'un continent donné, à l'échelle de temps de 40 ans (2050).

mutualisation comme nouvelle organisation des schémas logistiques à partir de sa définition et des principes proposés.

Chapitre 2. Repenser l'organisation logistique pour dépasser l'antagonisme actuel

Face à la globalisation économique et à la concurrence exacerbée, l'organisation logistique d'aujourd'hui doit être repensée pour dépasser l'antagonisme actuel, à savoir, satisfaire les demandes croissantes des clients tout en intégrant des contraintes de plus en plus fortes sur les activités logistiques. De ce fait, il est nécessaire entre autres technologies de rechercher une organisation plus performante. Cette nécessité s'est traduite dans deux directions. D'une part, la logistique est devenue une clé du succès pour la plupart des entreprises vis-à-vis des changements structurels de la chaîne logistique, par exemple du fait de l'éloignement de la production et de la consommation, de la spécialisation des usines ou encore de l'assurance de la disponibilité des produits en linéaire, etc. Ces changements impliquent des mutations de la logistique. D'autre part, il existe de plus en plus de contraintes sur l'organisation logistique, telles que le principe Juste-à-temps, le développement durable, la croissance du coût des opérations (notamment liée à l'évolution du prix du baril) etc. Il semble que la logistique, à date, a une difficulté pour dépasser ces contraintes tout en maintenant sa productivité. En conséquence, il devient nécessaire de réfléchir dès à présent à une organisation logistique future, qui tienne compte des besoins émergeants antagonistes cités.

Plus particulièrement, l'activité de transport, même externalisée est actuellement considérée comme une préoccupation majeure des entreprises. Le transport des marchandises qui est en pleine croissance ces dernières années doit maintenant faire face à des difficultés économiques et écologiques. Les nouveaux principes de gestion des flux logistique, tels que la tension des flux selon le principe Juste-à-Temps, font accroître la demande de transport mais aussi baisser sa productivité en raison de la taille d'envoi diminuée et la distance de livraison augmentée dans certains cas. Ces contraintes contradictoires sont un défi non seulement pour optimiser le coût du transport mais aussi pour réduire l'empreinte environnementale (ce sujet sera développé dans le chapitre relatif à la logistique durable). C'est dans ce contexte que nous proposons une nouvelle organisation : la « mutualisation logistique », et nous cherchons à montrer que c'est une solution à même de répondre en partie aux défis actuels.

C'est pourquoi, nous proposons d'abord de souligner l'importance croissante de la logistique dans les activités économiques, puis nous analyserons son développement, notamment dans le secteur de la grande distribution en France, là où le concept de la mutualisation sera analysé et testé. Puis, nous nous concentrerons sur les problématiques de

transport qui sont induites par les stratégies émergentes de déstabilisation logistique par l'amont et l'aval (Dornier, 1997) des industriels et des distributeurs, spécialement sur le TRM (Transport Routier de Marchandises). L'analyse des solutions existantes logistiques permettra de démontrer qu'elles ne sont pas à même de dépasser les contraintes antagonistes actuelles. Nous allons ensuite identifier le potentiel d'amélioration important du transport de marchandises, en s'appuyant sur les travaux menés sur l'efficacité du transport. Cela nous permettra de confirmer qu'il existe un potentiel d'amélioration par la mise en œuvre d'une nouvelle organisation logistique. Ainsi, nous introduirons la mutualisation comme étant une nouvelle solution possible. C'est pourquoi, dans la dernière partie du chapitre, nous définirons les principes de la mutualisation.

2.1 Mutations de la logistique et développement du transport de marchandises

La croissance rapide de l'activité logistique est intrinsèquement liée à la mondialisation économique dont elle est à la fois la conséquence et le soutien. Encore en développement remarquable, la logistique non seulement permet les échanges de biens au niveau national et international, mais aussi délivre un service qui améliore notre vie quotidienne. Son importance est évidente et fait que c'est un domaine qui a été très étudié dans les années passées.

2.1.1 Quel est le rôle de la logistique dans l'économie présente?

Il est de notoriété que la logistique est l'art de gérer les flux physiques à un niveau de performance souhaité (Dornier, 1997). Cependant, ce n'est que récemment que l'importance de la chaîne logistique, ou littéralement la chaîne d'approvisionnement, ou encore SC (*Supply Chain*) en anglais, est reconnue par les organisations commerciales, même si elle existe depuis bien plus longtemps (Christopher, 2005). Depuis les années 90, la logistique est considérée comme un secteur d'activité économique à part entière. D'après une thèse soutenue en 2007 (Francois, 2007), il est fait mention du nombre de publications scientifiques par an depuis 1994 contenant « *supply chain* » dans leur titre. La tendance est en forte croissance, 1217 en 2004 par rapport à 27 en 1994. Cela signifie que la logistique s'est progressivement imposée comme une fonction stratégique dans les entreprises et comme un domaine de recherche à part entière dans le monde académique.

Quand on regarde les statistiques aujourd’hui, on trouve que la logistique joue un rôle indispensable dans le marché de l’emploi et dans l’économie en France, mais également dans les autres pays industrialisés. Ainsi, selon des statistiques de 2004, le marché de la logistique est estimé à 8% du PIB (Produit Intérieur Brut) européen (environ 710 milliards d’euros). Ce secteur pris au sens large concerne un million d’entreprises employant plus de 5 millions de salariés dans l’UE (Union Européenne) (Source : Agence Française pour les investissements internationaux, 2005). En France, la croissance des emplois au titre de la logistique a été considérable entre 1982 et 1990 (+20,6%) ensuite stable entre 1990 et 1999 (+2,3%). En 2004, tous les secteurs d’activité de la logistique concernent près de 1,5 million d’emplois en France, dont 800 000 emplois pour les métiers logistiques (planning, ordonnancement, entreposage, emballage, etc.) et 700 000 pour le transport (Mariotte, 2007). Il est estimé que le coût logistique global représente en moyenne à 11,9 % du chiffre d’affaires net des entreprises françaises en 2008, contre 9,9% en 2005 (Source : Benchmark ASLOG 2008/2009⁵). Donc le poids économique de la logistique ne peut pas être ignoré.

La logistique est également un levier du développement de l’économie. Pour expliquer ce fait, il est intéressant de comparer la croissance de l’économie et du transport de marchandises dans les décennies passées. Ainsi, en France, il est intéressant d’analyser le graphique de la Figure 2.1 dessous qui est tiré d’un rapport de 2008 du PREDIT (Programme de recherche et d’innovation dans les transports terrestres) du MEEDDAT (Ministère de l’écologie, de l’énergie du développement durable et de l’aménagement du territoire)⁶, voir (MEEDDAT, 2008). En effet, sur cette figure, on peut voir que, entre 1962 et 1974, les quatre indices suivants, le PIB, la production industrielle, le transport en tonne et le transport en tonne-km se sont tous accrues au même rythme. Après une stagnation entre 1975 et 1985, la logistique a vivement repris sa croissance, surtout en tonne-km à partir de l’année 1995. L’élasticité⁷ annuelle du trafic en tonnes-km au PIB est respectivement de 0,68 entre 1962 et 1975, de -0,12 entre 1975 et 1985 et de 1,76 entre 1985 et 1999. C’est-à-dire que la logistique et surtout le transport de marchandises a cru plus vite que le PIB et est devenu un des accélérateurs de la croissance économique depuis les années 90.

⁵ http://www.aslog-network.com/UserFiles/file/ASLOG_Benchmarking_2009_C.pdf

⁶ Il s’appelle maintenant MEEDDM (Ministère de l’Énergie, de l’Énergie, du Développement durable et de la Mer) depuis le remaniement ministériel du 23 juin 2009. Mais on utilise son ancien nom présenté dans le rapport.

⁷ L’élasticité du trafic au PIB est le rapport entre la variation relative du trafic (en tonne-km) et la variation relative du PIB par rapport à l’année précédente.

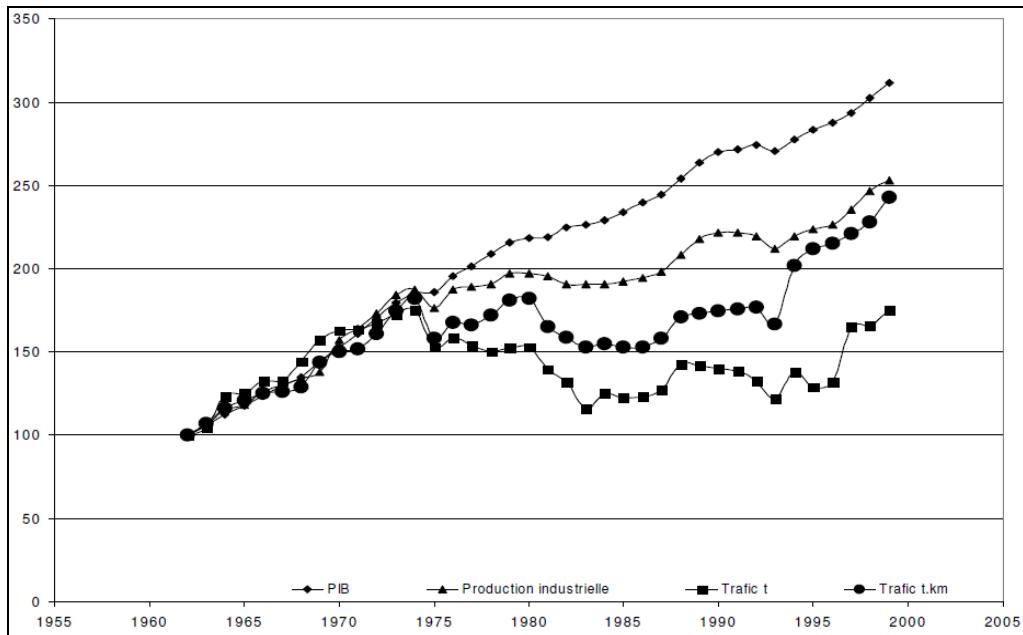


Figure 2.1 : Activité économique et transport de fret en France (1962=base 100) Source :
(MEEDDAT, 2008)

Il existe plusieurs facteurs qui permettent d'expliquer cet essor de la logistique et du transport de fret. D'une part, la globalisation de l'économie conduit à une augmentation des échanges nationaux et internationaux. Au fur et à mesure de l'abaissement progressif des barrières commerciales internationales, les flux de marchandises entre les pays sont plus fréquents qu'avant, par exemple la croissance des phénomènes d'importation-exportation depuis les années 90. D'autre part, le développement des activités économiques dans la chaîne logistique a également fait accroître le besoin de transport. Ainsi, la spécialisation des usines et la logique de Juste-à-temps en production demandent plus de transport pour réaliser des livraisons plus fréquentes et à plus faible volume (McKinnon, 2000). De plus, la délocalisation des usines vers des pays qualifiés à bas coût (notamment le sud-est asiatique) conduit à des livraisons ayant des trajets beaucoup plus longs. Cette volonté de tendre les flux est devenue multi sectorielle et le commerce de détail qui cherche à diminuer ses niveaux de stock et à accélérer la rotation des produits n'échappe pas à cette règle. En conséquence, l'accroissement du transport est important depuis les années 90, à la fois en terme de kilomètre parcouru mais aussi en nombre de moyens du fait d'une efficience en baisse.

La logistique est donc devenue non seulement un moteur de création d'emplois, mais aussi une nécessité pour la croissance économique. C'est pourquoi nous allons définir plus précisément la logistique dans le paragraphe suivant et identifier les activités qu'elle recouvre.

2.1.2 Définition et activités de la logistique

La logistique est une discipline qui existe depuis bien longtemps dans notre vie quotidienne et son esprit reste le même dans tous les secteurs d'activités. Il existe plusieurs définitions disponibles de la logistique, par exemple celle de l'AFNOR⁸ :

« La logistique, c'est planifier, exécuter et maîtriser les mouvements et les mises en place des personnes ou des biens, ainsi que les activités de soutien liées à ces mouvements et ces mises en place, au sein d'un système organisé pour atteindre des objectifs spécifiques ».

(PIPAME et CNAM, 2009a)

La définition citée ci-dessus est à l'origine de la norme AFNOR NF X 50-600 (PIPAME et CNAM, 2009a)⁹. Cette définition est particulièrement générique : la logistique sert essentiellement toutes les activités économiques qui ont besoin de mouvoir des marchandises voire des personnes.

Pour transférer l'esprit de la logistique du niveau théorique au niveau opérationnel, on a donc besoin de décrire d'une part les entités et les activités logistiques, et d'autre part les méthodes et outils pour gérer ces éléments, il s'agit respectivement la chaîne logistique et sa gestion. Les paragraphes suivants ont pour but de donner les définitions sur ces deux termes en détaillant les activités et le développement de la discipline.

2.1.2.1 La chaîne et le réseau logistique

Dans un premier temps, on constate que le concept de la chaîne logistique n'est pas universel mais dépend souvent de différents points de vue. Ainsi, il y a un certain nombre de définitions sur ce terme dans la littérature.

Plusieurs définitions de la chaîne logistique (SC) sont données dans de nombreux travaux, voir (Stadtler et Kilger, 2000), (Lambert et Cooper, 2000), (Mentzer et al., 2001), (Roux et Liu, 2003), (Chopra et Meindl, 2004), (Christopher, 2005) ou encore (Harrison et Hoek, 2005) etc. Les discussions à ce niveau permettent de comprendre qu'il n'existe pas une définition universelle de la SC. Cependant, d'une manière générale, on pourra reconnaître que la SC est essentiellement un réseau d'organisations concernant tous les processus et les activités

⁸ L'AFNOR est un groupe international de services organisé autour de 4 grands domaines de compétences : la normalisation, la certification, l'édition spécialisée et la formation (www.afnor.org)

⁹ PIPAME : Pôle interministériel de prospective et d'anticipation des mutations économiques

associées, directes ou indirectes allant de l'amont jusqu'à l'aval, pour répondre à une demande de client (Christopher, 2005), autrement dit « *du fournisseur du fournisseur au client du client* » (Roux et Liu, 2003). De plus, les flux d'informations au cours des processus représentent également une partie indissociable de la chaîne logistique. Donc la notion de SC comprend au minimum deux flux, l'un physique et l'autre d'information. De plus, dans les théories logistiques récentes, le flux financier est également une dimension importante à prendre en compte (Christopher, 2005).

Les relations entre les membres d'une SC peuvent être différentes selon la complexité de chaîne comme le montre la Figure 2.2 (Mentzer et al., 2001). La largeur d'une chaîne logistique dépend également du point de vue de chaque membre. Par exemple, pour une petite entreprise avec une stratégie d'achat et de distribution locale, son système logistique pourrait être aussi simple que la chaîne logistique directe (la forme (a) dans la figure). Par contre, le directeur de la chaîne logistique d'un constructeur automobile doit avoir une vision plus large et globale sur son système logistique, car une collaboration plus cohérente avec ses équipementiers est nécessaire, voire avec les fournisseurs de ses fournisseurs. Ce type de relation logistique est illustré par la forme (b) ou (c) de la Figure 2.2.

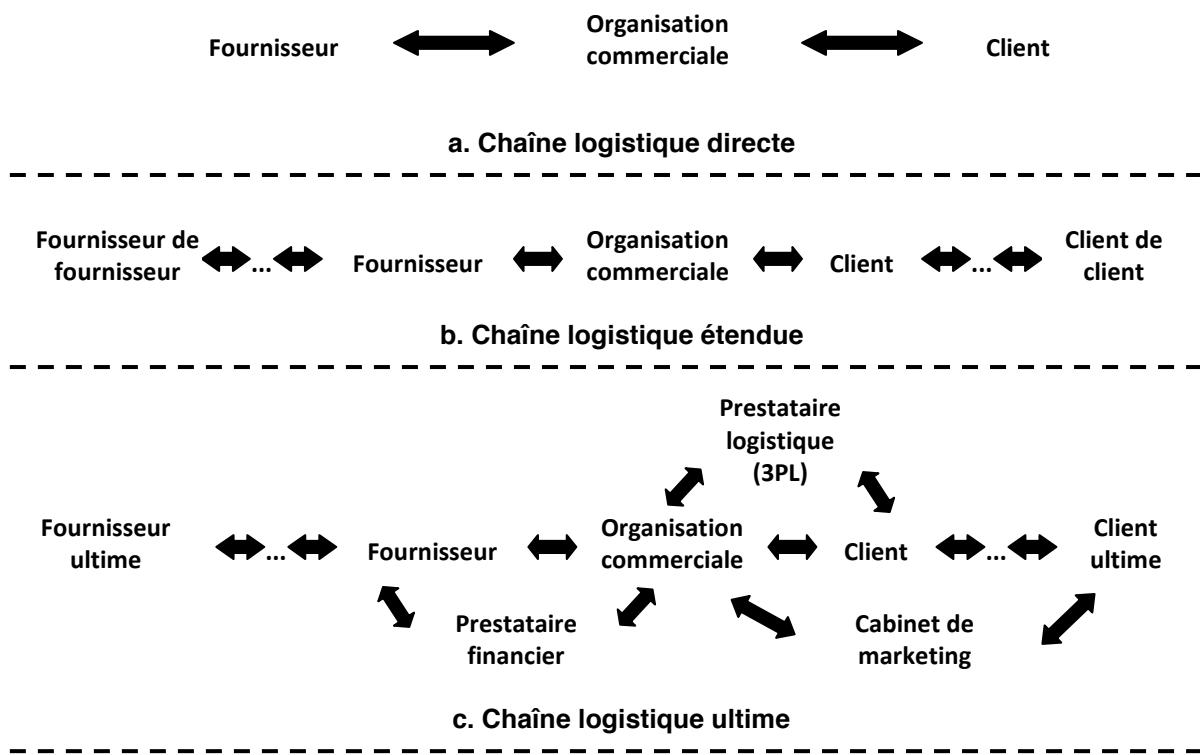


Figure 2.2 : Type de relation d'une chaîne logistique (Mentzer et al., 2001)

Comme le montre l'étude (Burgess et al., 2006), la logistique actuelle ne peut pas être simplement réduite à la notion de « chaîne » mais de plus en plus elle doit être vue comme un « réseau », ou ***Logistics Network*** et ***Supply Networks*** dans sa terminologie anglo-saxonne , du fait de la complexité du système logistique d'une entreprise. Ainsi, la configuration (c) de la Figure 2.2 montre que l'organisation commerciale a de nos jours plusieurs fournisseurs et plusieurs clients en parallèle. Cela induit des relations qui ne peuvent plus être représentées uniquement par une chaîne mais par plusieurs chaînes interconnectées. De ce fait, le système logistique est devenu un réseau d'approvisionnement (*Supply Network*), comme le montre la Figure 2.3 issue de l'étude (Lambert et Cooper, 2000).

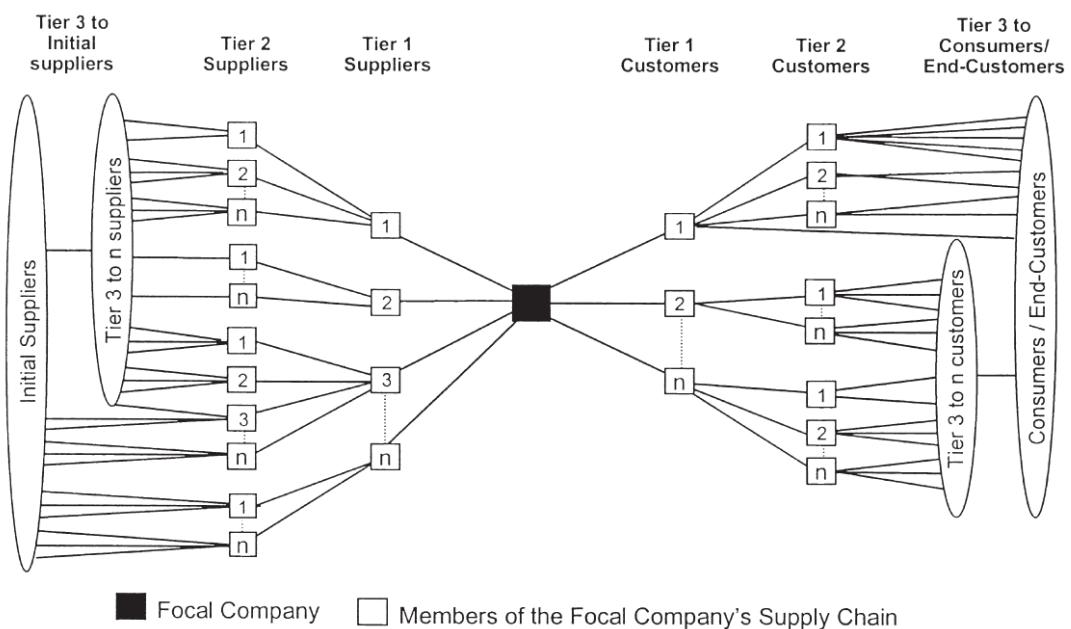


Figure 2.3 : Exemple de la structure du Supply Chain Network (Lambert et Cooper, 2000)

Le concept de « réseau » a été discuté dans de nombreuses recherches et selon différents axes de travail., Par exemple, le problème de l'incertitude dans l'industrie informatique au travers de l'étude du *Manufacturing Network* dans (Davis, 1993). Récemment (Stefanovic et al., 2009) proposent une méthodologie et un outil (basé sur SQL) de modélisation et de simulation des flux de la production à la distribution dans un réseau logistique, avec pour objectif de simuler les coûts logistiques du réseau (production, stockage, etc.). De façon générale, (Romano, 2003) fait une revue de la littérature sur le sujet du *Supply Network* selon trois types de réseaux de différents produits : la fabrication et la distribution internationale de chaussures, la fabrication de semi-conducteurs et la production et la distribution de fils synthétiques et de tapis. Dans le même temps, des études comme (Chen et Paulraj, 2004) et (Burgess et al., 2006), qui analysent le développement du SCM, révèlent que les praticiens de

la logistique doivent avoir une vision plus globale des réseaux. A ce propos, (Montreuil et al., 2009) ont créé récemment un nouveau concept et un nouvel outil informatique, le « *Supply Network Mapper* » ou « *Supply Web* » dont l'objectif est de cartographier les réseaux d'approvisionnement et de distribution avec les données logistiques (approvisionnements, demandes, ressources logistiques, etc.) dans une perspective de réseaux. Cet outil peut fournir des visions adaptées aux décideurs en se basant sur une relation collaborative des réseaux et un système intégré.

La notion de réseau d'approvisionnement est donc un concept important pour la mutualisation, puisque cette dernière comme nous le montrerons repose essentiellement sur une relation collaborative entre des chaînes indépendantes. C'est donc une collaboration entre les acteurs dans ces réseaux. C'est aussi la raison pour laquelle le terme de « réseau d'approvisionnement » est employé plusieurs fois dans cette thèse. Ce terme est à différentier de réseau logistique qui renvoi à des infrastructures et non à des flux.

Nous comprenons que la chaîne logistique et le réseau d'approvisionnement sont des représentations de la relation des acteurs qui la composent. Par contre, les décisions dépendent du ou des point(s) de vue des acteurs et de leurs objectifs. C'est pourquoi, nous allons illustrer le fonctionnement et les objectifs de ces concepts par une présentation de la gestion de la chaîne logistique dans le paragraphe suivant.

2.1.2.2 Supply Chain Management

La gestion de la chaîne logistique, ou SCM (*Supply Chain Management*) en anglais, a été popularisée par les consultants dans les années 1980. C'est une approche intégrée de gestion pour gérer les flux de matières et d'informations entre les acteurs au sein d'une chaîne. La définition de SCM peut être trouvée dans de très nombreuses études. Cependant, elle n'admet pas une définition universelle. Par exemple, des livres (Chopra et Meindl, 2004), (Christopher, 2005) et (Harrison et Hoek, 2005), ou bien des articles (Croom et al., 2000), (Lambert et Cooper, 2000), (Mentzer et al., 2001), (Tan, 2001) et (Burgess et al., 2006) soulignent les discussions relatives à l'ensemble des termes utilisés dans les nombreuses définitions disponibles.

Les définitions du SCM sont souvent résumées et classifiées par rapport au temps d'apparition. Par exemple, Croom et al. ont fait une liste sur des définitions du SCM issues

des publications de 1985 à 1998 (Croom et al., 2000). D'une manière similaire, (Mentzer et al., 2001) donnent une autre liste de définition complémentaire sur la même période. Malheureusement, leurs conclusions sont identiques : il n'existe pas une définition universelle de ce terme. Cette absence est en partie liée à la manière dont le concept de chaîne logistique a été élaboré, comme discuté dans le paragraphe 2.1.2.1. Autrement dit, la notion de « *Supply Chain Management* » est souvent déclinée et adaptée en fonction du point de vue des différents décideurs.

Néanmoins, le *Council of Supply Chain Management Professionals*¹⁰ aux Etats-Unis, qui est le premier leader professionnel dans ce domaine, donne la définition suivante :

« Supply chain management encompasses the planning and management of all activities involved in sourcing and procurement, conversion, and all logistics management activities. Importantly, it also includes coordination and collaboration with channel partners, which can be suppliers, intermediaries, third party service providers, and customers. In essence, supply chain management integrates supply and demand management within and across companies. » (CSCMP, 2010)

(Lambert et Cooper, 2000), en se référant à une définition antérieure du même organisme en 1986, estiment que le SCM est :

« The process of planning, implementing, and controlling the efficient, cost-effective flow and storage of raw materials, in-process inventory, finished goods, and related information flow from point-of-origin to point-of-consumption for the purpose of conforming to customer requirements. » (CSCMP, 1986)

Nous pouvons constater que la définition récente est plus large. La coordination et la collaboration sont particulièrement soulignées, ainsi que les démarches de réalisation. De plus, les services de prestataires logistiques (*Third Party Service*) sont soulignés. Tous ces changements signifient que le SCM est devenu prégnant dans la relation partenariale logistique.

Selon la définition la plus récente, le SCM peut être considéré comme une approche qui cherche à gérer l'ensemble des activités logistiques dans le but de construire un système efficace en couvrant toutes les activités dans la chaîne. La coordination et la collaboration

¹⁰ <http://cscmp.org/aboutcscmp/definitions.asp>

sont des moyens essentiels pour atteindre cet objectif. Il est donc nécessaire d'identifier les activités principales du SCM pour voir comment la coordination et la collaboration sont réalisées.

Activités du SCM

Au-delà de la définition, il est également nécessaire d'envisager les principes et les objectifs du SCM pour connaître son fonctionnement. (Christopher, 2005) a identifié quatre principes essentiels du management logistique : ***Responsiveness, Reliability, Resilience et Relationships***, nommés 4Rs'. Le premier concerne l'agilité de la chaîne logistique. Face à la stratégie du Juste-à-temps, la chaîne logistique doit réagir vite à la demande des clients. Le deuxième est en fait la fiabilité du service, autrement dit, les demandes doivent être systématiquement satisfaites. La résilience est également une performance clé de la chaîne logistique. Cette caractéristique sert à faire face aux problèmes non prévisibles, de type politique, social, commercial ou de nature accidentelle... Bien qu'une chaîne résiliente n'ait peut-être pas la meilleure performance économique, elle présente une capacité plus importante pour faire face à des changements incertains. Le dernier principe identifié est la relation entre les acteurs, qui est effectivement le corps du management logistique et qui vise à trouver les meilleures solutions en dépassant une simple relation client-fournisseur.

En prenant en compte ces 4 principes, on peut se demander quelles sont les activités principales du SCM dans l'industrie ? (Mentzer et al., 2001) déclinent qu'il y a sept activités principales du SCM comme montrées dans la Tableau 2.1. Il est évident que l'idée principale est de construire un système dans lequel tous les acteurs sont intégrés pour apporter des avantages concurrentiels, puis les partager.

a. Comportement intégré (pour incorporer les clients et les fournisseurs)
b. Partager mutuellement des informations entre les acteurs
c. Partager mutuellement les risques et les bénéfices entre les acteurs
d. Coopération
e. Même but et même intérêt sur le service aux clients
f. Intégration de processus
g. Etablir et maintenir des relations à long terme avec les partenaires

Tableau 2.1 : Activités principales du SCM (Mentzer et al., 2001)

Tout d'abord, les entreprises doivent élargir leur comportement intégré dans le but de mieux incorporer leurs clients et leurs fournisseurs afin de rendre plus efficace leur système logistique. En conséquence, la connexion doit être plus solide et plus transparente entre eux. C'est pourquoi on demande un partage mutuel d'informations entre participants et aussi le partage des risques et des bénéfices dans cette intégration (Gruat La Forme et al., 2007). La coopération est essentiellement une démarche pour l'intégration logistique.

En fait, la coopération se réfère à des activités similaires ou complémentaires, coordonnées et réalisées par les entreprises dans une relation d'affaires afin de produire des résultats mutuels ou singuliers qui sont supérieurs à ceux attendus au cours du temps (Anderson et Narus, 1990). De plus, la coopération n'est pas limitée aux besoins de l'opération en cours mais se passe à plusieurs niveaux de management, par exemple à la fois au niveau stratégique et opérationnel. Elle est de fait une coordination inter-fonctionnelle à travers les membres d'une chaîne logistique. Pour que la coopération soit efficace, les membres d'une chaîne doivent avoir le même but et le même intérêt par rapport au service à apporter aux clients (Bowersox, 1990). Il s'agit également d'un prémissse pour choisir les partenaires à l'intégration.

L'intégration de processus peut s'opérer à plusieurs niveaux, de l'acquisition de la matière à la production, ou encore à la distribution. En réalité, ces intégrations sont souvent réalisées par des gestionnaires inter-fonctionnels, des fournisseurs intégrés dans un site de production, ou des fournisseurs de type 3PL pour la distribution. Vu que l'intégration se fait profondément entre les membres de la chaîne, des relations à long terme avec les partenaires doivent être établies puis maintenues pour avoir un système de SCM efficace.

Il faut cependant souligner que les activités résumées dans le Tableau 2.1 ne sont pas indépendantes mais au contraire interconnectées. Par exemple, si un supermarché est en train de faire une promotion sur un type de produit, cette information doit être partagée avec le fournisseur et le transporteur afin de garantir un approvisionnement à date dans la bonne quantité et au bon moment.

En outre, les activités du SCM se sont beaucoup développées pour faire face aux demandes logistiques. A ce propos, nous allons illustrer les développements importants du SCM dans le prochain paragraphe.

Développement du SCM

Le cheminement suivi par le développement du SCM a été résumé dans (Hesse et Rodrigue, 2004), voir la Figure 2.4. Avant les années 60, nombre d'activités logistiques avaient déjà retenu l'attention dans le domaine industriel. Toutefois, elles ont été étudiées d'une manière indépendante l'une de l'autre. Il manquait en fait une vision moins parcellaire sur ces activités. A partir des années 1980s, les activités ont été généralement classifiées selon deux branches, le management des articles et la distribution. Puis, dans la décennie suivante, ces deux dimensions ont été intégrées en donnant un nouveau nom, la logistique. Ensuite, les technologies de systèmes d'informations, le marketing et le planning ont été ajoutés à la logistique. Avec ces nouveautés, la logistique est devenue un sujet multi-dimensions et de plus en plus riche, pour aboutir au SCM.

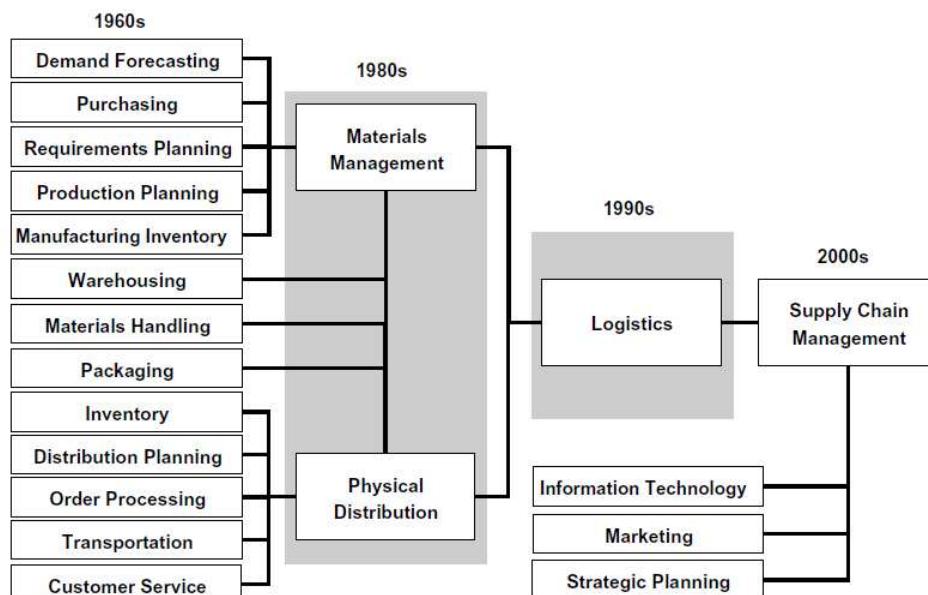


Figure 2.4 : L'évolution d'intégration du SCM (Hesse et Rodrigue, 2004)

(Hesse et Rodrigue, 2004) font quatre constats sur l'évolution du SCM. Le premier est que le commerce et la vente ont été fondamentalement restructurés par la notion de chaîne logistique avec l'intégration de la demande de transport marchandises. Deuxièmement, le transport était traditionnellement considéré comme un outil simple pour livrer les flux physiques, alors que la logistique est plutôt un outil plus complexe pour organiser les transports en respectant le délai de livraison. Troisièmement, en fonction du changement structurel de la macro-économie, les activités orientées vers la demande sont devenues prédominantes. Bien que la livraison traditionnelle fût principalement gérée par le fournisseur, la chaîne logistique actuelle est de plus en plus dirigée par les demandes des clients. Enfin, le

service logistique est de plus en complexe et sensible au temps, c'est pourquoi le secteur logistique dans de nombreuses entreprises est maintenant sous-traité à des prestataires de service de type 3PL.

Après l'introduction des concepts relatifs à la logistique, la partie suivante analyse le développement du transport qui a connu une très forte croissance ces dernières années.

2.1.3 Accroissement du transport des marchandises par suite de déstabilisation logistique par l'amont et l'aval

Le transport est une activité au cœur de la logistique, son coût est un des premiers facteurs lors d'une optimisation des coûts globaux logistiques. C'est pourquoi, comme les coûts d'entreposage restent stables depuis les années 2000, les entreprises se concentrent maintenant vers la minimisation des coûts de transport (PIPAME et CNAM, 2009a). L'importance du transport peut également être indiquée par la répartition des coûts logistiques. D'après le Benchmark 2008/2009 de l'ASLOG sur tous les secteurs commerciaux concernant la logistique en France, le transport représente en général plus de la moitié des coûts logistiques globaux (transport, entreposage, logistique, finance, etc.), soit 54% du chiffre d'affaires net de la logistique en 2009, contre 51% en 2005. Une des raisons qui explique cet accroissement est l'augmentation du prix du transport, mais l'autre cause plus évidente est l'augmentation de la demande de transport.

Dans le cadre de leur fonctionnement, **la logistique et le transport sont souvent interdépendants**. Par exemple, la contrainte de transport apporte des limites sur l'organisation logistique, telles que l'accessibilité urbaine ou les législations sur le transport, etc. En revanche, la mise en œuvre de la logique du flux tendu au niveau de la production industrielle et de la distribution a un double impact sur le transport des marchandises et particulièrement par la route, c'est-à-dire la fréquence et la quantité de livraison (Léglise, 2008). Donc, le transport se voit dans l'obligation d'élever son niveau de performance afin de satisfaire les différentes demandes. Pourtant, l'amélioration des indicateurs du transport, comme le taux de chargement des moyens et les trajets à vide, etc., n'est souvent pas pris en considération au niveau des décisions logistiques.

La France, comme les autres pays très concernés par la logistique, a connu des mutations de la production et de la distribution. Nous allons maintenant nous concentrer sur le problème de la déstabilisation de la logistique. Cela peut s'expliquer par les stratégies des industriels en

amont et celles des distributeurs en aval. Particulièrement les impacts sur le transport vont être étudiés. La discussion suivante est principalement basée sur la thèse de PP. Dornier (Dornier, 1997).

Du côté des fournisseurs, à la suite de la mondialisation économique, ils ont repensé leur stratégie de production. Il en ressort quatre stratégies essentielles au niveau de la production dans (Dornier, 1997) : la délocalisation, la différenciation retardée, le JAT (Juste-à-Temps, ou Just-in-Time en anglais) et la spécialisation des unités de production.

	Objectif principal	Conséquence	Impacts logistiques	Impacts sur transport
Délocalisation des Productions	Gain sur le coût de la main d'œuvre ou sur la fiscalité	Séparation géographique des zones de production et des zones principales de consommation	Circulation de flux plus complexe entre l'unité de production et le centre de consommation	Taille accrue par la réalisation d'envois consolidés mais éloignement des zones
Différenciation retardée	Elément de solution pour concilier les impératifs de productivité et de flexibilité	Transformation physique du produit en dehors des usines	Aptitude des sites et des moyens logistiques (entrepôts, dépôts, secteurs de transport) à réaliser des opérations de production	Abaissement de la taille d'envois au besoin nécessaire (limite retour de stock)
Juste-à-Temps	Réponse au plus vite à la demande avec une production tirée par l'aval	Limitation des stocks et réactivité	Substitution des stocks par la circulation d'information et par les capacités de transport	Chute de la quantité de livraison et augmentation de la fréquence
Spécialisation des unités de production	Economie d'échelle et gaine de productivité	Séparation croissante entre la zone géographique de production et la zone géographique de consommation	Circulation accrue des sites de production vers les zones de consommation pour recomposer les gammes	Taille d'envoi plus grande mais avec des distances allongées par la nécessité de passer par différentes unités

Tableau 2.2 : Stratégies industrielles et leurs impacts logistiques et sur le transport (d'après le tableau 10 dans (Dornier, 1997))

Le Tableau 2.2 complète le tableau de (Dornier, 1997) en y ajoutant une colonne qui identifie les impacts des stratégies industrielles sur le transport. En effet, les quatre stratégies sont favorables à la réduction du coût de production en matière et/ou en main d'œuvre, cependant, il apparaît que le coût de transport augmente dans la plupart de ces stratégies

industrielles. En effet, mise à part la stratégie de la différenciation retardée, les autres stratégies supportent un besoin accru de transport. Ces stratégies peuvent donc être remises en cause si le coût de transport augmente.

Par exemple, la délocalisation de la production repose souvent sur la recherche d'un coût de main d'œuvre moins élevé ou des incitations locales. Mais cet éloignement de la zone de production par rapport à la zone de consommation a induit une forte augmentation des échanges internationaux. La spécialisation des usines, en s'appuyant sur le principe d'économie d'échelle, conduit de son côté à l'obligation de recomposer la gamme des produits issus des différents sites de production spécialisés et, donc, conduit à plus de transport aussi. Globalement, ces deux stratégies encouragent un accroissement de transport à la fois en volume et en distance.

La stratégie JAT, qui s'est répandue de façon progressive dans la plupart des entreprises, est aussi un défi croissant pour le transport. Deux impacts sont envisageables, la quantité et la fréquence de livraison. Conformément au principe du JAT, les livraisons doivent arriver au bon moment, au bon endroit et dans la quantité demandée (Harrison et Hoek, 2005). Vu son objectif de réduire les stocks de produits finis ou semi-finis (dans la chaîne de fabrication), la quantité des envois est souvent petite en recourant à des livraisons de type LTL (*Less Than Truckload*). D'ailleurs, la fréquence de livraison est également en croissance, car la demande en aval n'a pas reculé. Autrement dit, ce principe conduit aussi à une augmentation des transports.

Les analyses ci-dessus identifient que le besoin accru du transport de fret est issu principalement des nouvelles stratégies industrielles. C'est la raison pour laquelle, les fournisseurs souhaitent de plus en plus réduire le coût de transport, à travers l'externalisation des activités par exemple. Cette solution concerne également les distributeurs, car les mutations qu'ils ont engendré en aval conduisent au même problème : le demande et le coût du transport augmentent.

Du côté des distributeurs, les impacts sur la logistique sont essentiellement dus à des actions marketing, commerciales et à la satisfaction des demandes des consommateurs finaux (MEEDDAT, 2008). Les stratégies menées par les enseignes ont conduit à certaines mutations dans le secteur de la grande distribution.

	Objectif principale	Conséquence	Impacts logistiques	Impacts sur transport
Organisation par format de Point de vente	Modification des canaux de distribution Elargissement de la couverture d'activité commerciale	Diversification des Points de vente	Différenciation du canal d'approvisionnement	Augmentation des variations de volume ; Allongement des distances
Gestion de l'assortiment	Réponse spécifique par micro-marché	Adaptation et personnalisation	Recomposition de la chaîne de valeur du produit Différenciation retardée Entreposages plus complexes	Diminution de la taille de lot ; Augmentation de la fréquence de livraison ; Variabilité des valeurs
Accélération de la rotation des stocks	Réduction des niveaux de stock	Diminution de la charge financière et d'immobilisation des capitaux	Flux tendu Système GPA Gestion des stocks plus performante	Déclin des volumes de livraison par référence mais Augmentation de fréquence

Tableau 2.3 : Stratégies de distributeurs et les impacts logistiques et sur transport (d'après le tableau 15 dans (Dornier, 1997))

Du tableau ci-dessus, il ressort le fait que l'évolution stratégique des distributeurs fait croître aussi la demande de transport. Par exemple, la diversification des canaux de distribution a pour but de couvrir au mieux les demandes des consommateurs selon les conditions locales. Par exemple les petits PDV se trouvent souvent loin des sites d'approvisionnement et la quantité de leur commande est plus faible que les autres formats de point de vente, donc la livraison directe ne serait pas le meilleur choix dans ce cas-là. De ce fait, les stratégies de livraison indirecte sont strictement utilisées, telles que les tournées, les centres de consolidation, le cross-docking etc. Le besoin de transport est accru pour livrer l'ensemble des points de vente par format.

De plus, l'assortiment et les prix bas sont les deux armes importantes de la compétitivité de la grande distribution de nos jours. D'abord, l'assortiment, qui porte à la fois sur la largeur (nombre de familles différentes de produits) et sur la profondeur (nombre de produits par famille), est la clé de la satisfaction des différents besoins des consommateurs. Mais la gestion de l'assortiment est très souvent limitée par la surface des magasins. Donc pour atteindre le bi-objectif d'enrichir l'assortiment et d'assurer la disponibilité des produits en linéaire, une solution pertinente est d'augmenter la fréquence des livraisons. Quant au prix, il s'avère que

l'accélération de la rotation des stocks est efficace pour réduire l'ensemble des coûts logistiques (en termes de surface stockée, d'immobilisation, etc.), donc c'est aussi une direction que les enseignes et les détaillants cherchent à développer. A cette fin, ils préfèrent largement des livraisons de petits volumes mais à fréquence plus élevée. Les mutations logistiques en aval sont donc aussi la cause de l'augmentation de la demande de transport et d'une possible non optimisation.

En définitive, la déstabilisation de la logistique par l'amont et par l'aval conduit à un accroissement du transport. Dans une perspective de flux tendus dans toute la chaîne, la livraison des marchandises aujourd'hui se caractérise par deux aspects : fréquence de livraison élevée et faible volume. De plus, la tendance à la centralisation des stocks induit un accroissement des distances parcourues. C'est pour cela que le transport des produits de grande consommation (PGC) est en pleine croissance. Cela rejoint la discussion sur la corrélation entre transport de marchandises et croissance économique au début du chapitre, c'est-à-dire le rôle que la logistique joue comme un catalyseur à la croissance du PIB.

De ce fait, l'efficacité du transport devient un indicateur important pour améliorer la logistique. C'est pourquoi, nous allons illustrer dans le prochain paragraphe la performance de la logistique actuelle au niveau du transport, afin de démontrer la nécessité d'une nouvelle organisation logistique.

2.1.4 Efficacité actuelle du transport routier de marchandises

Le transport de marchandises terrestre, à ce jour, se fait principalement par la route (Source SOeS, Compte des Transports) : plus de 80% du fret (tonne-km) a été transporté par le mode routier en 2008 (ce sujet sera développé dans le troisième chapitre relatif à la logistique durable). De ce fait, l'efficacité du transport des marchandises par véhicule (TRM) a été analysée dans certains nombres de travaux.

Par rapport au contexte de cette thèse, nous allons nous intéresser au transport de fret dans le secteur de la grande distribution. Par exemple, un travail de McKinnon (McKinnon et al., 2003) porte sur le transport des produits d'alimentation **au RU (Royaume-Uni)**. Les objectifs de cette étude sont principalement d'estimer l'efficacité du transport de marchandises alimentaires, et également d'identifier la potentialité d'améliorer l'efficacité des livraisons. A ce propos, les auteurs mènent une enquête pendant 48 heures sur 28 entreprises ayant 53

flottes indépendantes, se composant de 3088 remorques, de 1466 tracteurs et de 546 camions. Cinq indicateurs ont été analysés pour estimer la performance du transport : la saturation des véhicules, le taux de trajet à vide, l'utilisation temporelle des camions, la déviation de livraison par rapport au planning et la consommation de carburant.

Au niveau de la saturation du véhicule, les auteurs ont constaté un coefficient d'occupation moyen à 70% en surface et à 53% en poids. Selon leurs résultats, le taux de chargement en volume est d'environ de 50%. Deuxièmement, au niveau des trajets à vide, sur la période étudiée, 0,28 million de kilomètres sur 1,45 million kms au total ont été parcourus par des véhicules à vide, soit 19% des trajets totaux. Cette valeur connaît une variation de 1% à 43% au niveau de chaque flotte. Ce qui signifie que certaines entreprises sont capables de trouver des missions de livraison en retour alors que d'autres non. Le troisième indicateur est sur l'utilisation temporelle des véhicules. En moyenne, il y a seulement 28% du temps où les véhicules roulent, 28% du temps est qualifié de libre, 16% du temps est consacré aux activités de chargement et de déchargement, 15% pour pré-charger et attendre de partir, 7% pour maintenance, puis 2% pour faire des pauses. Quatrièmement, concernant le taux de service, 29% des livraisons sur un échantillon de 15 252 avaient un retard de 43 minutes en moyenne. Ceci s'explique par la congestion du trafic, les problèmes issus du ou des lieu(x) de chargement ou de déchargement, et des problèmes au niveau du transporteur (organisation du site, planification du transport, etc.). Dernièrement, quant à la consommation de carburant, cette enquête montre un indice en moyenne de 17,96 ml carburant / palette-km pour un tracteur de 38 tonnes. En fait, l'efficacité énergétique du transport est souvent mesurée en carburant consommé/palette-km. Mais il est difficile de comparer cet indice, car il dépend de plusieurs facteurs, comme la conduite, le taux de chargement, la catégorie des véhicules, etc. En s'appuyant sur les résultats de McKinnon ci-dessus, un travail mené par Ballot et Fontane (Ballot et Fontane, 2008c) a calculé le Taux de Rendement Synthétique (pour la méthodologie TRS, voir aussi (Ballot et Fontane, 2008b)) : le TRS moyen des camions étudiés dans (McKinnon et al., 2003) est de 14%. Il s'agit donc un rendement d'utilisation des moyens insuffisant.

Parmi les indicateurs étudiés ci-dessus, certains peuvent être comparés avec ceux du rapport du Département du Transport de la GB (Grande-Bretagne) (Department For Transport, 2008). Ce rapport qui est mis à jour chaque année depuis 1998 a pour objectif de donner une évaluation sur la performance du transport routier de marchandises pour tout type de

véhicules en GB. S'appuyant sur une étude d'enquête ayant conduit à 14 000 réponses en 2008, il révèle que le taux moyen de chargement en poids des véhicules est de 58%, sur l'ensemble des véhicules immatriculés en GB, uniquement pour le transport de marchandises et supérieur à 3,5 tonnes. Cette valeur est légèrement supérieure à celle du rapport de McKinnon. Néanmoins, il faut expliquer que les deux facteurs sont obtenus de manière différente. Celui de McKinnon est une constatation réelle sur les flottes de véhicules. L'autre (du gouvernement) est issu de la statistique : le rapport entre les flux transportés actuels et les flux maximaux théoriquement transportés par autant de camion-km. Donc le dernier est un taux théorique. D'ailleurs, si l'on regarde cette valeur sur la période allant de 1998 à 2008, elle a malheureusement tendance à baisser, de 62% en 1998 à 58% en 2008. Au niveau des kms parcourus à vide, le chiffre donné par le département est de 29% en moyenne et il est largement supérieur à celui du rapport McKinnon. Pour les autres indicateurs, malheureusement, ils ne sont pas mentionnés dans le rapport gouvernemental.

Une étude en 2004 réalisée **en Allemagne** fait un bilan de transport similaire (Léonardi et Baumgartner, 2004). A travers un questionnaire administré auprès de 50 prestataires de transport allemands qui ont des flottes de véhicules de différentes catégories, cette étude obtient un taux d'occupation en moyenne de 60% en volume et de 44% en poids sur toutes les classes de véhicules étudiées. Ces taux sont encore plus faibles que ceux constatés en Grande-Bretagne. En outre, ces valeurs sont particulièrement basses dans le cas des tracteurs < 40 tonnes. Par ailleurs, le taux de trajet à vide est de 17% sur l'ensemble de l'échantillon. Ce taux est comparable à celui obtenu par McKinnon.

Malgré le fait qu'il n'existe pas un indicateur officiel sur le taux de remplissage des véhicules en transport de fret en France, la potentialité d'améliorer les transports est observable dans plusieurs travaux. Par exemple, dans la partie de contexte du rapport (PIPAME et CNAM, 2009b), il est mentionné que « *les véhicules roulent en moyenne à 2/3 de charge et que 20% des trajets sont parcourus à vide* » pour le transport de fret au niveau national. Le taux des trajets à vide est comparable avec celui du MEEDDM qui annonce que ce taux national s'établit à 25% sur l'ensemble des véhicules (6889 camions + 13895 tracteurs) en unité véhicule-km en 2008¹¹. Quant au taux de remplissage, bien qu'il ne soit pas précisé, le ratio de 2/3 mentionné dans le rapport (PIPAME et CNAM, 2009b), montre que les camions en France peuvent être mieux utilisés. La première enseigne française, Carrefour,

¹¹ http://www.statistiques.equipement.gouv.fr/article.php3?id_article=1245, §3.2.

annonce qu' « *elle estime à 10 % le potentiel d'amélioration* » du taux de remplissage en surface de la flotte de camions qu'elle mobilise pour l'approvisionnement de ses points de vente (Noyer, 2010a). Ce constat d'amélioration dans l'utilisation des moyens de transport routiers peut être transposé au cas du ferroviaire.

En effet, le transport ferroviaire en France a connu d'importantes modifications dans la façon d'opérer du principal acteur à savoir la branche fret de la SNCF. La difficulté majeure rencontrée par les chargeurs provient de la disparition progressive du wagon isolé au profit de la notion de train entier (théoriquement 26 wagons pour une destination). Par nature, le transport ferroviaire est adapté pour des distances plus importantes (supérieure à 400 km) et à des flux à fort volume et/ou pondéreux. Le passage progressif à la logique de train entier a contribué à reporter une partie du flux sur le transport routier. En effet, le trafic de fret de la SNCF a connu un recul de 20% passant de 50 à 40 milliards de t-km entre 2002 et 2007¹².

Bien que les travaux présentés sur l'efficacité du TRM ne soient pas issus des mêmes zones géographiques et soumis aux mêmes hypothèses, les constats sont convergents : l'efficacité du TRM montre des marges de progrès. Principalement, le taux de chargement des véhicules et les trajets à vide sont les deux facteurs clés à améliorer et la potentialité est importante. En plus, en raison des mutations et de la déstabilisation de la chaîne logistique discutées dans les paragraphes ci-avant, le taux de chargement des TM est en général en train de reculer, ainsi (McKinnon, 2000) indique que le taux moyen de chargement en poids des camions aux RU a diminué de 3% en 1999 par rapport au niveaux de l'année 1990. Donc, il est nécessaire de chercher des solutions qui pourront améliorer l'efficacité du transport.

Il faut en outre constater que l'efficacité du TRM analysée concerne des pays où les 3PL sont très implantés, comme le montre la Figure 2.14. Les 3PL ne sont pas donc une réponse suffisante pour avoir un TRM efficace dans le contexte actuel et à venir.

2.1.5 Nécessité d'une nouvelle organisation logistique pour améliorer le transport terrestre des marchandises

Paradoxalement, l'efficacité du transport de fret de nos jours est encore insuffisante et il existe encore un potentiel d'amélioration important du transport y compris pour la grande distribution, comme le montre le paragraphe précédent. Ceci nous permet de faire l'hypothèse que ce potentiel est difficile à mobiliser par les schémas logistiques actuels.

¹² <http://archives.lesechos.fr/archives/2009/lesechos.fr/03/18/300337459.htm>

En effet, la collaboration logistique aujourd’hui s’opère essentiellement au niveau vertical, c'est-à-dire la relation fabricant-prestataire de services logistiques-distributeur. Dans ce type de relation, les prestataires jouent un rôle de plus en plus important en raison des mutations de la logistique, comme l’externalisation des activités logistiques des industriels et la centralisation des stocks, etc. Ils deviennent des coordinateurs de flux notamment au niveau du transport. Cependant, les résultats mitigés sur le transport de marchandises, comme on l’a montré, signifient qu’il est difficile de dépasser la performance actuelle par la collaboration traditionnellement verticale. Une autre dimension de coopération est potentiellement nécessaire : la coopération horizontale.

La coopération horizontale consiste en une collaboration entre les acteurs au même niveau, par exemple entre les fournisseurs, entre les prestataires, ou entre les distributeurs dans une chaîne logistique. L’introduction de ce principe a pour objectif de mettre en commun des schémas et des réseaux logistiques dédiés, autrement dit, de faire de la mutualisation logistique. Une telle organisation permettra de décloisonner par les flux les relations nouées verticalement entre les cocontractants (Filser et al., 2001).

De ce point de vue, il apparaît que le concept de mutualisation pourrait aussi améliorer l’efficacité du transport de marchandises, car elle peut faire dépasser les contraintes antagonistes issues des relations verticales. C’est pourquoi, dans les paragraphes suivants, nous allons étudier la mise en œuvre de la mutualisation logistique, à travers l’identification des principes la concernant.

2.2 La mutualisation logistique : une nouvelle démarche de massification des flux

Dans cette partie, nous abordons une organisation logistique qui a pour but de massifier les flux : la mutualisation logistique. En effet, il existe depuis longtemps de nombreuses études sur les démarches de consolidation spécialement pour le transport de fret. C’est pourquoi, nous allons d’abord dresser un état de l’art sur les démarches existantes qui visent à consolider les flux de marchandises afin de positionner le concept de mutualisation.

2.2.1 Etat de l'art sur les démarches existantes de consolidation des flux

Essentiellement, la consolidation repose sur une idée « simple » qui consiste à massifier les marchandises au niveau du transport. Sa définition peut être trouvée dans de nombreuses références. Par exemple, (Pooley et Stenger, 1992) définissent que la consolidation du transport « refers to the strategy of combining multiple shipments into a single group » ; (Hall, 1987) la décrit comme « the process of combining different items, produced and used at different locations and different times, into single vehicle loads » ; de façon similaire, (Campbell, 1990) déclare que la consolidation est la stratégie qui « allows more efficient and more frequent shipping by concentrating large flows onto relatively few links between terminals ». Ainsi, la consolidation repose sur un principe qui consiste à réunir plusieurs chargements indépendants en une expédition unique afin de réaliser des économies d'échelle sur le coût du transport.

La consolidation des flux de marchandises est un sujet qui a été beaucoup exploré. C'est pourquoi, nous avons choisi de classer les travaux menés en fonction des moyens mobilisés pour réaliser la massification. Comme le montre le Tableau 2.4, il s'agit de **la consolidation des stocks par transport direct, de la consolidation par les moyens de transport et de la consolidation en réseau** (Hall, 1987).

Stratégies de consolidation abordées	Références étudiées
Consolidation des stocks par transport direct: - Stockage de produits finis - Regroupement de commandes (consolidation d'envois)	(Eppen, 1979), (Blumenfeld et al., 1985), (Hall, 1987), (Pooley et Stenger, 1992), (Speranza et Ukovich, 1996), (Bookbinder et Higginson, 2002), (Cheung et al., 2003), (Lee et al., 2003), (Çetinkaya et al., 2006),
Consolidation par les moyens de transport : - Tournée de véhicules	(Burns et al., 1985), (Hall, 1987), (Campbell, 1990), (Laporte, 1992), (Bertazzi et al., 1997), (Desaulniers et al., 1998), (Toth et Vigo, 2002), (Kara et al., 2004) (Ergun et al., 2007), (Hsu et al., 2007), (Doerner et al., 2008), (Ubeda et al., 2010)

Consolidation en réseau : --Hub-and-Spoke --Cross-docking --Merge-In-Transit --Mutualisation (coopération horizontale)	(O'Kelly et Miller, 1994) et (O'Kelly et Bryan, 1998), (Dornier, 1997), (Nozick et Turnquist, 1998) et (Nozick et Turnquist, 2001), (Pirkul et Schilling, 1998), (Tuzun et Burke, 1999), (Crainic, 2000), (Hinojosa et al., 2000), (Syam, 2002), (Chopra, 2003), (Croxton et al., 2003b), (Ambrosino et Grazia Scutella, 2005), (Klose et Drexl, 2005), (Melachrinoudis et al., 2005), (Amiri, 2006), (Prodhon, 2006), (Jeong et al., 2007), (Keskin et Üster, 2007)
---	--

Tableau 2.4 :L'état de l'art des mesures de la consolidation de fret

2.2.1.1 La consolidation des stocks par transport direct

Cette stratégie de consolidation se base sur le transport direct depuis un site central du fournisseur vers les clients, appelé le « *drop shipping* » (Chopra, 2003). Ce type de consolidation se traduit par deux démarches. La première consiste à consolider les produits finis en amont, sans considération de la destination finale, dans un point de stockage pour atteindre un volume d'envoi optimal, par exemple TL (*Full Tuckload*), en expédition. Ensuite, pour répondre à plusieurs commandes, un regroupement sera effectué à l'entrepôt dans un même moyen de transport au niveau de l'expédition, voir la Figure 2.5.

A travers la consolidation des stocks, le taux d'utilisation du moyen pour une livraison globale fournisseur/client est donc amélioré. En plus, pour les fournisseurs à fort volume et notamment pour les produits pondéreux (ex : la boisson), la consolidation d'envoi permet d'un possible report modal de route à chemin fer. Le coût du transport est alors réduit.

Particulièrement dans le secteur du commerce de détail, les distributeurs ou les détaillants possèdent souvent un DC (centre de distribution) pour réaliser une deuxième consolidation en aval. Ainsi, la chaîne logistique se compose de deux maillons (voire trois si le fournisseur a aussi un centre de consolidation). Mais théoriquement le fonctionnement de la consolidation en amont et en aval est similaire.

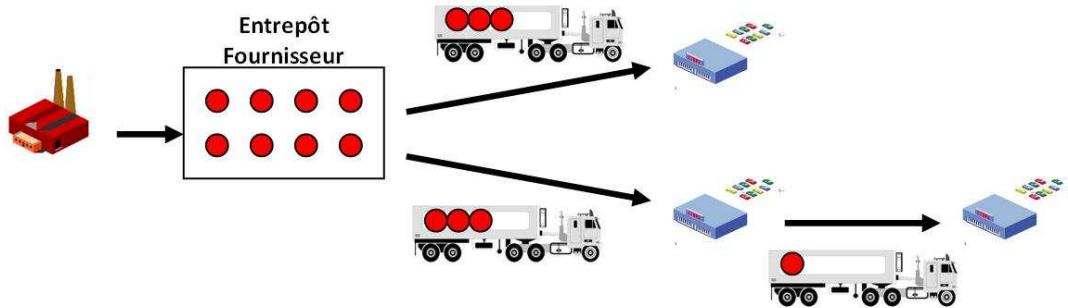


Figure 2.5 : Exemple de la consolidation des stocks d'un fournisseur par transport direct

Etant donné que la consolidation d'envois en regroupant les commandes en transport direct peut être effectuée par un transport «multi-drop» vers les clients (un camion sert plusieurs clients lors d'une livraison), il faut bien distinguer ce type de consolidation de celle opérée par le moyen de transport (essentiellement la tournée de véhicules) ci-après. Par exemple, (Pooley et Stenger, 1992) expliquent que les différences entre ces deux stratégies se situent à deux niveaux. D'une part, la décision de la combinaison des commandes : le regroupement de fret pour la consolidation d'expédition est décidé par le chargeur, mais pour la consolidation en moyen de transport le regroupement dépend plus du transporteur (la planification du transport, la disponibilité de moyen, etc.). D'autre part, au niveau de la consolidation des stocks, le chargeur ne paye que le trajet aller pour livrer ses clients, en revanche le trajet de retour est souvent compris dans le compte propre du transporteur lors de la consolidation en moyen de transport. De plus, si le transport concerne plusieurs donneurs d'ordres, le transporteur facture à part les segments de livraison pour chaque chargeur, voir la Figure 2.6 ci-après.

Encadré 1 : Différence entre la consolidation d'envois et Multi-drop

Pour un fournisseur qui a plusieurs usines, la centralisation des marchandises est aussi concernée lors du regroupement de commandes de clients. Dans les années 70, (Eppen, 1979) a prouvé que la centralisation des stocks par le regroupement des commandes des clients peut réduire la totalité du coût d'immobilisation des stocks et du coût de pénurie de produits. Mais le transport n'a pas été discuté dans cette étude.

Concernant le transport, (Çetinkaya et al., 2006) soulignent que la consolidation d'envois est en général soumise à deux critères : le délai et/ou la taille d'envois consolidés. Le premier concerne les commandes qui doivent satisfaire au même intervalle de temps et relativement l'autre critère assure que l'expédition consolidée est toujours à une quantité optimale (ex. un volume de TL). Evidemment le deuxième critère conduira à la meilleure performance au

niveau du coût du transport en expédition, car les moyens de transport sont remplis. Cependant, comme (Pooley et Stenger, 1992) le montrent, la consolidation d'envois peut certes diminuer le coût du transport mais aussi augmenter le délai de livraison par rapport à un transport indépendant vers les clients.

Certains travaux prennent en compte à la fois le niveau des stocks au point de consolidation (ex. entrepôt) et le temps de consolidation du fret pour déterminer la stratégie optimale de transport. Le regroupement des commandes pour un client peut probablement améliorer la productivité du transport mais peut aussi conduire à une augmentation du niveau de stock en consolidation. (Speranza et Ukovich, 1996) analysent conjointement ces deux éléments à travers le cas d'un fournisseur et d'un client avec des demandes multi-produits. L'objectif de cette étude est de construire un modèle d'aide à la décision de livraison permettant de minimiser les coûts de transport et d'immobilisation des stocks soumis à une fréquence de livraison donnée, cela conduit à un problème d'optimisation. Le niveau des stocks en consolidation est très dépendant du temps en consolidation de fret. A cet égard, (Bookbinder et Higginson, 2002) proposent une modélisation probabiliste pour calculer le temps maximum en stocks qui convient à la quantité consolidée à expédier pour un type de produit.

Le niveau des stocks à l'entrepôt est également influencé par la stratégie de réapprovisionnement de l'usine vers l'entrepôt. Sur ce point, (Blumenfeld et al., 1985) analysent la relation entre la production, le niveau des stocks et le transport afin de déterminer la meilleure stratégie de transport en minimisant les coûts logistiques concernés. Dans une étude comparative, (Lee et al., 2003) construisent un modèle dynamique pour déterminer l'ordonnancement des transports sortants en prenant en compte à la fois le niveau de stock et l'approvisionnement en amont et les demandes en aval. L'objectif est de minimiser les coûts liés au transport et aux stocks via la consolidation de flux sortants d'entrepôt.

La possibilité de la consolidation par le recours à un 3PL a aussi été étudiée. Ainsi, (Cheung et al., 2003) étudient l'opportunité de la consolidation de conteneurs au port de Hong Kong au sein de chaînes logistiques globales. Il en résulte que la consolidation entre les 3PL locaux doit être vue comme une nécessité pour le transport de fret en transit à Hong Kong. De façon similaire, (Tyan et al., 2003) montrent que la consolidation de fret entre les 3PL globaux est capable de réduire le coût de transport, spécialement au niveau des moyens de transport de coût élevé comme le transport aérien.

Les études analysées ci-avant soulignent l'importance de la stratégie de la consolidation des stocks par transport direct. En effet, cette stratégie est beaucoup utilisée dans les entreprises, car il s'agit d'une démarche de consolidation facile à mettre en œuvre. Ce type de consolidation est de plus en plus mis en cause par la tension de flux selon le principe du Juste-à-temps : la taille d'expédition tend en général à baisser et la fréquence de livraison tend à augmenter. En conséquence, le temps de consolidation est réduit. Il est de plus en plus difficile de remplir les moyens de transport par ce type de consolidation.

C'est pourquoi, nous allons maintenant aborder une autre stratégie de consolidation : la consolidation par les moyens de transport.

2.2.1.2 La consolidation en moyen de transport

La consolidation au niveau des moyens de transport, repose essentiellement sur des TV (tournées de véhicules), ou VRP (*Vehicle Routing Problem*) en anglais. Les tournées peuvent se décliner selon différents cas de figure : N -fournisseurs/Mono-client, Mono-fournisseur/ N -clients ou encore N -fournisseurs/ M -clients. Le dernier cas est illustré de façon simplifiée dans la Figure 2.6 comme un exemple.

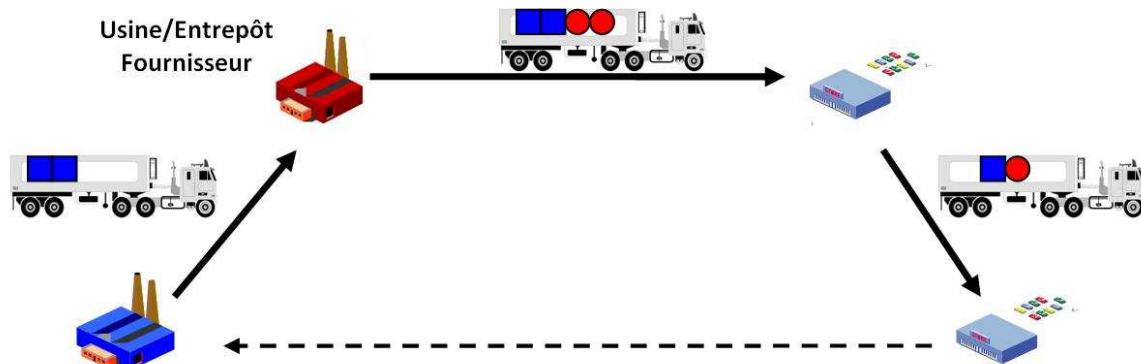


Figure 2.6 : Exemple de la consolidation en moyen de transport (tournée de véhicules)

Ce type de consolidation consiste à massifier les flux en provenance de différents chargeurs dans un seul camion. Comme cela, les flux pourront être ramassés et livrés en aboutissant à un volume de TL afin de réduire le coût du transport. C'est la raison pour laquelle cette stratégie est quasi privilégiée pour les flux à petit volume. Ces conclusions se réfèrent à l'étude de Burns (Burns et al., 1985). Ce travail a comparé la livraison directe et la livraison en tournée (appelé « peddling » dans l'article) au niveau du coût du transport et des stocks, dans le cas d'un réseau de distribution ayant un fournisseur (un produit) et plusieurs

clients avec des demandes connues. Il s'avère que le recours à des tournées en transport présente un meilleur bilan économique si les produits sont à forte valeur ajoutée, si la distance entre le fournisseur et les clients est importante, si la répartition des clients est dense et si les demandes correspondent à des petits volumes. Néanmoins, la planification des tournées présente des difficultés de mise en œuvre opérationnelle.

La collaboration entre les donneurs d'ordres peut être une solution pour améliorer la performance de la consolidation en moyen. A cet égard, (Ergun et al., 2007) montrent que la collaboration entre les chargeurs permet d'améliorer l'efficacité du transport, notamment pour réduire les parcours à vide des camions en les repositionnant de façon plus pragmatique. Dans cette étude, les auteurs proposent que les chargeurs partagent leurs informations logistiques (demandes, délais, etc.) dans un système d'information où les prestataires pourront les récupérer afin d'organiser les transports. Cette démarche atténue évidemment les parcours à vide pour repositionner les camions au niveau de la planification des trajets.

La consolidation en moyen est actuellement une démarche utilisée au niveau du transport, notamment pour les flux de faible volume. Il s'avère qu'elle est performante pour améliorer l'efficacité du transport. De ce fait, le VRP a été largement étudié par la communauté scientifique. Cependant, la mise en œuvre est souvent limitée, car les transporteurs sont souvent des PME et n'ont pas de visibilité sur la demande (Bernadet, 1997). En conséquence, les prestataires à ce jour doivent relever un certain nombre de défis s'ils souhaitent mieux organiser leurs ressources logistiques.

Les deux stratégies de consolidation ci-dessus se situent en général aux niveaux tactique et opérationnel, car elles dépendent des contraintes opérationnelles (délais, disponibilité des véhicules, etc.). C'est pourquoi, nous allons ensuite explorer le troisième type de consolidation qui repose sur des décisions stratégiques : la consolidation en réseau, spécialement la conception de réseaux.

2.2.1.3 La consolidation en réseau

La consolidation des flux dans un réseau logistique est en général définie comme un problème de conception des réseaux de distribution (*DNDP, Distribution Network Design Probleme*) (Ambrosino et Grazia Scutella, 2005). Ce problème se situe à un niveau stratégique et est à long terme.

La littérature montre qu'il existe principalement trois pratiques afin de réaliser la consolidation en réseau : Hub/Hub-and-Spoke, Cross-docking, Merge-in-Transit.

<i>Hub ou Hub-and-Spoke</i>
(a) A large retailer or manufacturer having many trading partners; (b) A reference for a transportation network as in “hub and spoke” which is common in the airline and trucking industry; (c) A common connection point for devices in a network; (d) A web “hub” is one of the initial names for what is now known as a “portal”.
<i>Cross-docking</i>
A distribution system in which merchandise received at the warehouse or distribution center is not put-away, but instead is readied for shipment to retail stores. Cross docking requires close synchronization of all inbound and outbound shipment movements. By eliminating the put-away, storage and selection operations, it can significantly reduce distribution costs.
<i>Merge-in-Transit</i>
The process of combining or “merging” shipments from multiple suppliers which are going directly to the buyer or the store, bypassing the seller. Effectively, this is a “drop shipment” from several vendors to one buyer, which is being combined at an intermediary point prior to delivery.

Tableau 2.5 : Définition des trois organisations logistiques principales du Council of Supply Chain Management Professionals en 2010¹³

◆ **La pratique Hub ou Hub-and-Spoke**

Typiquement, un réseau logistique en H&S est un système en étoile visant à réduire les coûts, spécialement du transport. Des produits d'origines différentes sont livrés et consolidés au niveau du point central, puis ils sont expédiés directement du centre aux destinations, comme le montre la Figure 2.7. Concernant sa définition, on peut se référer à celle-là du CSCMP dans le Tableau 2.5 ou à celle-ci du Conseil National des Transports comme suit :

« Le hub est le point central pour la collecte, le tri, le transbordement et la redistribution des marchandises dans une zone géographique donnée. Le concept “Hub” est issu du vocabulaire utilisé en transport aérien, tant pour les personnes que pour les marchandises. Il consiste en la desserte de tous les points d'un territoire déterminé à partir d'un point central unique (concept "Hub and Spoke") »¹⁴.

¹³ <http://cscmp.org/digital/glossary/glossary.asp>

¹⁴ <http://www.cnt.fr/UserFiles/File/dossiers/TC/CNTRapportTCAnnexe12.pdf>

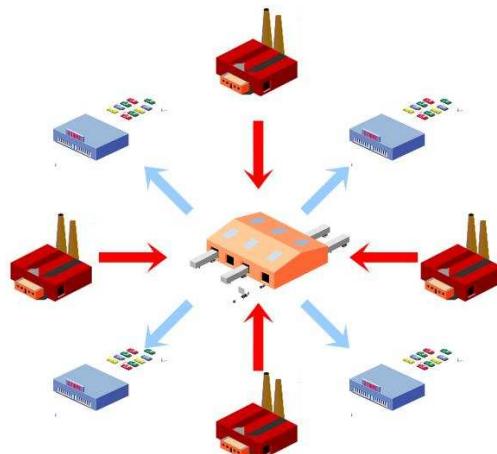


Figure 2.7 : Exemple du système Hub-and-Spoke

Les avantages du réseau H&S portent sur deux aspects du transport : le flux est consolidé et les liaisons sont simplifiées. Premièrement, le recours à un hub permet de consolider les flux d'origines différentes. Il conduit normalement à une amélioration de l'utilisation des moyens de transport. Deuxièmement, les liaisons entre les sites autour des hubs sont simplifiées par rapport à un système direct, autrement dit les livraisons directes. Comme l'exemple illustré dans la Figure 2.7, le nombre de liaisons est de 16 sans recours à un hub, il est réduit à 8, soit de $n*m$ à $n+m$ (n et m dénote respectivement le nombre d'usines et de clients), dans le cas de la mise en œuvre d'un hub. Cependant, le trajet est rallongé de manière significative. Il faut donc que le gain en remplissage compense le détour et le tri.

La mise en œuvre du H&S se réalise par des décisions à deux niveaux : stratégique et opérationnelle. En ce qui concerne les décisions stratégiques, il s'agit de la configuration des réseaux puis l'affectation des marchés (sites de fournisseurs ou de clients). En effet, l'affectation des marchés dépend souvent de la configuration des réseaux et les critères pour élaborer les transports. Les critères d'affectation pourront être par exemple le hub le plus proche, la minimisation de la distance ou le coût du transport, etc., voir (Campbell, 1990). D'ailleurs, la décision peut varier d'un horizon de temps à l'autre, voir (Hinojosa et al., 2000).

La configuration du réseau consiste à déterminer la quantité optimale de hubs et la localisation de ces installations. La sensibilité du nombre de hubs en rapport avec le transport, le stock et l'implantation du site a été analysée dans les études de (Nozick et Turnquist, 1998), (Nozick et Turnquist, 2001) et (Chopra et Meindl, 2004). En général, plus il y a de hubs, moins le transport est coûteux mais cela conduit à une augmentation des niveaux de stocks de sécurité et à un coût d'infrastructure plus important.

La localisation du hub est une autre décision stratégique, elle dépend de plusieurs facteurs. Ainsi, (Pirkul et Schilling, 1998) proposent une méthode heuristique qui permet d'optimiser le coût de transport total en localisant un hub parmi les candidats. (Syam, 2002) teste la possibilité de concevoir un réseau en prenant en compte plusieurs facteurs, tels que le transport, la localisation du hub, le regroupement des flux, le stock et la fréquence de commande afin de minimiser le coût total logistique. Il résulte que ce problème combinatoire est de type NP-difficile, il est donc difficile à résoudre. (Hinojosa et al., 2000) envisagent le problème de localisation du hub dans la cadre d'un réseau de multi-fournisseurs/multi-clients avec des commandes multi-périodes. A cette fin, une méthode heuristique utilisant la relaxation Lagrangienne est proposée dans cette étude. De plus, en considérant que l'emplacement d'usine a aussi un impact sur la localisation du hub, (Amiri, 2006) construit un modèle d'optimisation afin d'optimiser le coût de transport et le coût d'utilisation de l'usine et du hub avec une capacité donnée en déterminant la localisation des points du réseau.

Néanmoins, (O'Kelly et Bryan, 1998) montrent que certains modèles existants pour localiser les hubs ne prennent pas en compte l'effet d'économie d'échelle sur le transport, autrement dit, les modèles étudiés font l'hypothèse que le coût de transport est une fonction linéaire du flux. O'Kelly et Bryan pensent que c'est un biais car le coût du transport total s'accroît moins rapidement que la croissance du flux et soulignent qu'une fonction non-linéaire serait plus appropriée. Nous retenons la remarque de ces auteurs quant à la nature de la relation entre coût du transport et niveau de flux. Elle sera utilisée dans le prochain chapitre de cette thèse concernant nos choix de modélisation.

D'ailleurs, il est nécessaire de souligner que la conception de réseau, par exemple la localisation du hub et l'affectation des nœuds, est également concernée par les autres pratiques de la consolidation en réseau comme le Cross-docking et le Merge-in-Transits. De ce fait, certains travaux de recherche, comme (Crainic et Laporte, 1997), (Crainic, 2000) et (Klose et Drexl, 2005), etc., font l'état de l'art sur les modèles qui traitent des différents problèmes de conception de réseau.

Au niveau opérationnel, les décisions à prendre portent principalement sur la planification des tournées. (Zäpfel et Wasner, 2002) réalisent une étude de cas qui porte sur l'amélioration du système H&S d'un prestataire de messagerie afin d'améliorer la prise de décision opérationnelle. Afin de réduire les transports inefficaces qui résultent de l'obligation de passer systématiquement par un hub, Zäpfel et Wasner proposent une stratégie hybride : livraison par

le hub et livraison directe de point-à-point. Ils construisent un modèle d'aide à la décision pour élaborer les tournées au niveau opérationnel qui minimise le coût. Ils montrent que le coût du transport peut être réduit de 10% par rapport au cas actuel.

Or, il existe certains inconvénients à ce type de système logistique. Par exemple, (Zäpfel et Wasner, 2002) en révèlent deux : l'obligation de transit par le hub et l'asymétrie entre la demande de moyen de transport entrant et sortant du hub. Précisément, l'obligation de transit par le hub consiste en un allongement des distances parcourues par rapport au transport direct surtout lorsque la demande et la source sont proches. L'asymétrie entre les moyens à mobiliser en entrée et en sortie du hub résulte du fait que les camions entrants sont souvent mieux remplis que les camions sortants en raison du regroupement de commandes au niveau du fournisseur. De plus, en raison de la tension des flux, la fréquence des transports sortants (du hub au client) est normalement plus haute que celle des transports entrants (du fournisseur au hub). Cela peut également induire une asymétrie au niveau de la demande de transport. De ce fait, le système H&S sera plus adapté pour les cas de transport combiné, par exemple le cas rail-route du transport européen étudié dans (Jeong et al., 2007), et le cas du transport maritime exploré dans (Christiansen et al., 2007).

Les travaux discutés ci-dessus montrent que le système H&S peut induire des avantages sur le transport, notamment la réduction du coût du transport et le nombre des livraisons, mais aussi des désavantages comme l'obligation de passer par un hub et l'asymétrie entre la demande de transport entrant et sortant. De ce fait, afin de mieux remplir les moyens de transport liés au hub, le système H&S s'appuie en général sur un certain niveau de stocks au hub. C'est pourquoi, des autres pratiques logistiques sont élaborées dans l'objectif de réduire le niveau de stocks au hub, voir les enlever. Par exemple le principe du Cross-docking qui est exploré dans le paragraphe suivant.

◆ **La pratique du Cross-docking**

La deuxième pratique de consolidation à étudier est le **Cross-docking**. Plusieurs définitions de ce terme sont disponibles dans la littérature, par exemple celle citée dans le Tableau 2.5. En effet, comme le précise le livre (Filser et al., 2001), p.200, la terminologie anglo-saxonne de Cross-docking et celle française Plateforme sont équivalent au niveau d'infrastructure, défini comme : « *une infrastructure de simple éclatement, sans stockage de longue durée* » (Filser et al., 2001).

La recherche concernant le Cross-docking a commencé dans les années 80. (Hall, 1987) et (Pooley et Stenger, 1992) proposent le concept de base pour le Cross-docking qui est nommé respectivement la consolidation en terminal et la consolidation au point « Break-Bulk ». Puis, (Swaminathan et al., 1998) présentent un prototype du Cross-docking qui met l'accent sur l'absence de stock intermédiaire et particulièrement sur l'importance de la gestion des flux d'informations. D'ailleurs, au niveau de la conception de réseau, le sujet rejoint en principe la discussion sur la conception du système de H&S ci-dessous, mais avec une typologie plus ouverte.

En général, le Cross-docking est une pratique qui permet de réunir les flux issus de différents fournisseurs à un centre de transbordement (appelé CCD : Centre de Cross-docking, ou plateforme) où les flux sont allotis puis expédiés selon les destinations des clients sans entreposage à longue durée, comme le montre la Figure 2.8. A la différence du hub dans le H&S système, les marchandises sont entreposées au CCD pour une durée très courte, normalement quelques heures. Pour ainsi dire, les flux sur le CCD ne font que transiter. De ce fait, **le principe du Cross-docking assure qu'il n'existe pas, ou très peu de stocks au CCD.**

Le Cross-docking peut se réaliser de manière différente, principalement par l'allotissement chez l'industriel ou sur la plateforme (CCD). La première consiste à un regroupement de commandes au niveau industriel pour un client spécifique. Cette allotissement permet aux fournisseurs de préparer les palettes à destination d'un client. La deuxième manière, l'allotissement sur le CCD, se propose d'éclater les palettes reçues servir un pool multi-clients, puis les regrouper selon la destination finale.

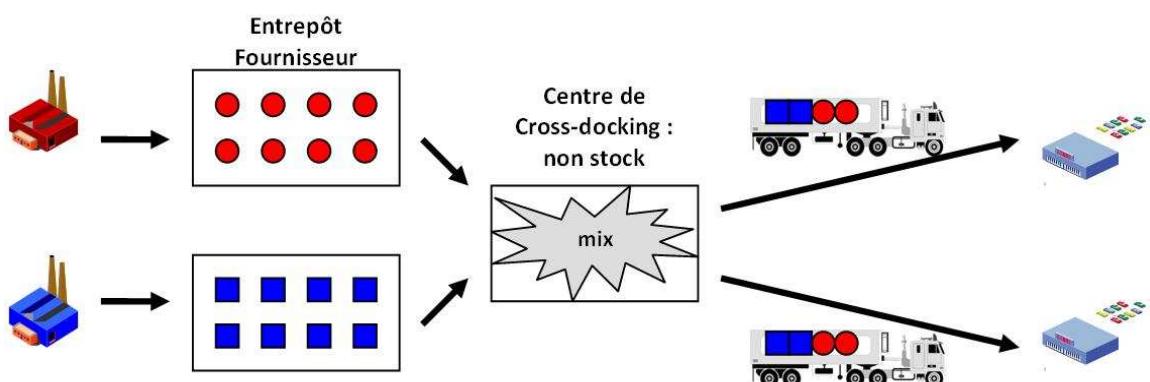


Figure 2.8 : Exemple du système de Cross-docking

Dès son apparition, le Cross-docking a retenu beaucoup d'attention dû à son pourvoir important de réduire les stocks. De ce fait, le Cross-docking est particulièrement adapté pour les produits frais, typiquement les produits avec des DLC (Date limite de consommation) très courte (Rognon, 2009).

Or, la mise en œuvre du Cross-docking rencontre souvent des difficultés au niveau de son organisation¹⁵. Cette stratégie table particulièrement sur une organisation d'ordonnancement des tâches sur la plateforme au niveau des réceptions et des expéditions très précises. Pour réaliser le Cross-docking il est de plus nécessaire d'avoir un système performant de gestion des informations logistiques, qui permet de gérer les transports et les flux avec un délai très court. Une telle organisation pointue n'est pas toujours réalisable pour les entreprises, notamment les petites et moyennes entreprises. C'est pourquoi, le Cross-docking n'est pas devenu la pratique dominante jusqu'à aujourd'hui au niveau de la gestion des flux hors produit frais.

◆ La pratique Merge-in-Transit

Par rapport aux deux cas précédents, la pratique **MIT (Merge-in-Transit**, appelé *in-Transit Merge* dans (Chopra, 2003)) a attiré relativement moins d'attentions. En général, le MIT peut être décrit comme ce qui est présenté dans le Tableau 2.5.

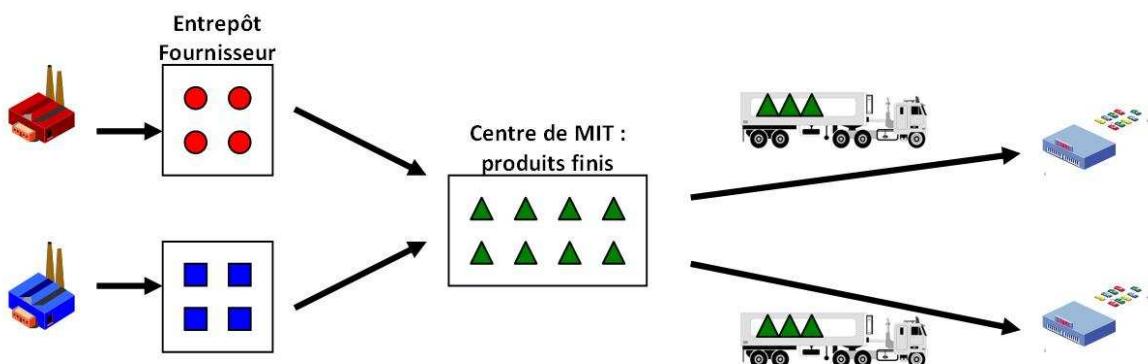


Figure 2.9 : Exemple du système de Merge-in-Transit

Cette pratique est adaptée typiquement pour les opérations logistiques liées au commerce électronique ou aux usines terminales du secteur automobile. Par exemple, dans le secteur de l'assemblage informatique, les composants (ex : CPU, écran, etc.) en provenance de différentes usines ou de différents fournisseurs (ex : Intel, Sony, etc.) sont consolidés au

¹⁵ http://www.faq-logistique.com/Cross_Docking.htm

centre de MIT pour fabriquer les produits finis (ex. les ordinateurs assemblés) qui seront envoyés directement aux clients, voir la Figure 2.9. (Croxton et al., 2003b) fournissent un modèle d'aide à la décision pour ce type de système logistique qui optimise le coût du transport et le niveau des stocks.

Des exemples dans le secteur de l'informatique, comme Dell et IBM, démontrent que cette organisation a un avantage notable pour faire face à la différenciation des produits. Sachant que les demandes des clients à l'horizon de temps sont souvent diverses et personnalisées dans ce secteur, la chaîne logistique doit être réactive pour y répondre dans un délai «court». La stratégie résultante est que les composants élémentaires sont consolidés dans une plateforme où l'assemblage est réalisé selon les options des clients.

Par rapport à la pratique du Cross-docking, la pratique MIT met l'accent sur la différenciation retardée et sur la valeur ajoutée au centre intermédiaire. Dans le système du Cross-docking, le centre CCD est normalement une plateforme de mixage de flux entrants et de préparation de flux sortants. Or, le centre de MIT intègre des opérations de fabrication de produits finis.

A travers l'analyse des stratégies de consolidation, il semble que chacune présente des avantages mais aussi des inconvénients, comme la comparaison illustrée dans (Chopra, 2003). Or, on se rend compte que la consolidation de flux de la grande distribution est actuellement en majorité réalisée par le regroupement de commandes en préparation au niveau de l'entrepôt en amont puis le regroupement des demandes au niveau de la plateforme en aval. Il s'agit donc actuellement de modélisation de stocks et de moyens, dans les catégories produits alimentaires (hors frais). Les démarches étudiées se sont en partie révélées inadaptées aux flux alimentaires classiques (déséquilibre amont, aval...), c'est la raison pour laquelle nous allons définir ce qu'est la mutualisation logistique.

2.2.2 Définition de la mutualisation logistique

Dans cette partie, nous allons définir le concept de la mutualisation en transport de fret, puis identifier ses principes de mise en œuvre dans le contexte de la grande distribution. De ce fait, il est d'abord montré les concepts existants qui sont liés au principe de la mutualisation.

2.2.2.1 Concepts existants concernant la mutualisation

La coopération horizontale et la distribution collaborative sont les deux conceptions proches de la mutualisation. Ces deux sujets sont à discuter par la suite à travers 1 identification et 1 analyse des travaux qui les abordent dans la littérature.

De manière générale, la coopération horizontale est définie par (Commission Européenne, 2001a) comme : «*Une coopération est de «nature horizontale» si elle fait l'objet d'un accord conclu entre des entreprises se situant au(x) même(s) niveau(x) du marché, ou de pratiques concertées entre de telles entreprises. Il s'agit, le plus souvent, d'une coopération entre concurrents. Elle porte, par exemple, sur des domaines tels que la recherche et le développement, la production, les achats ou la commercialisation.*» S'appuyant sur cette définition, nous pouvons constater que la coopération horizontale est en effet une collaboration entre les acteurs au même niveau du marché et qui peuvent être en concurrence.

La coopération horizontale a été la première fois appliquée à la logistique à grande échelle dans une étude (Cruijssen et Salomon, 2004), ainsi que dans la thèse de Cruijssen (Cruijssen, 2006). Dans l'étude (Cruijssen et Salomon, 2004) se basant sur une étude de cas sur le transport des fleurs aux Pays-Bas, ces auteurs trouvent que le partage de commande (*Order Sharing*) au niveau informatique entre transporteurs apporte une économie sur le coût du transport qui varie généralement entre 5 à 15%. Ce gain résulte de l'amélioration du transport (taux de remplissage de camion, trajets à vide, etc.), puisque le partage des commandes entre les transporteurs leur permet de mieux planifier les transports. De façon comparable, (Ergun et al., 2007) traitent de la collaboration entre les chargeurs et montrent qu'elle permet de diminuer les coûts cachés liés au transport réalisé par les prestataires, par exemple en réduisant les trajets à vide pour repositionner les camions. La collaboration ici porte également sur un partage d'informations via une plateforme informatique commune chargeurs-transporteurs. Ensuite, afin de confirmer l'intérêt potentiel de la coopération horizontale au niveau de la logistique, (Cruijssen et al., 2007) a réalisé une enquête auprès de 162 entreprises flamandes, dont 75% ont mentionné que cette stratégie de coopération pourrait augmenter la productivité de l'entreprise, par exemple en diminuant les transports à vide et/ou en utilisant mieux les entrepôts, etc. Le principal frein à la mise en œuvre d'une telle démarche réside dans la difficulté à bâtir des mécanismes de répartition équitable des gains entre les membres de la coalition. La difficulté de trouver un partenaire à long terme

pour une relation gagnant-gagnant est également mentionnée par les répondants. Ces difficultés sont également à relever lors de la mise en œuvre des principes de la mutualisation.

A part les travaux discutés ci-dessus, **la collaboration à travers un prestataire (3PL)** est le sujet le plus étudié en termes de la coopération horizontale. Par exemple, (Tyan et al., 2003) proposent une consolidation des flux expédiés par différents fournisseurs (d'ordinateur portable) en transport aérien au niveau d'un 3PL global. Il en ressort que cette consolidation par la distribution collaborative permet de réduire environ 6,7% le coût du transport par rapport au cas actuel. De même, (Cheung et al., 2003) analysent en théorie la probabilité et la perspective de la consolidation du fret en transit au port de Hongkong pour réduire le coût du transport maritime. Ces deux études analysent la possibilité de réaliser une consolidation secondaire au niveau des expéditions de différents chargeurs via des 3PL globaux. D'ailleurs, (Carbone et Stone, 2005) se concentrent sur l'évaluation de la relation collaborative entre les 3PL en Europe. Ils montrent que des alliances entre des 3PL européens pourraient fournir un service logistique plus cohérent et plus large.

Dans le même temps, **la logistique urbaine** ou rurale est aussi considérée comme un secteur possible pour appliquer de cette coopération horizontale. En réalisant une enquête par questionnaires auprès des détaillants de la ville Uppsala en Suède, (Ljungberg et Gebresenbet, 2005) indiquent que la nécessité de la coordination de la distribution est évidente pour la ville afin d'améliorer les transports en augmentant la fréquence de livraison (par la combinaison de livraisons) et en augmentant le taux de remplissage des camions. Cette démarche apporte de plus des avantages environnementaux tels que la réduction des émissions du transport, l'atténuation de la congestion trafic, la diminution du bruit, etc. Se basant sur le même principe, (Hageback et Segerstedt, 2004) proposent la « **codistribution** » pour les régions rurales. La livraison pour les régions rurales ou les zones peu peuplées est souvent réalisé au prix d'un coût du transport plus élevé, car la distance des livraisons est plus longue et, de fait, les trajets à vide sont plus importants (Hageback et Segerstedt, 2004). De ce fait, la stratégie de distribution collaborative, la codistribution peut être une pratique utile pour les détaillants ou les fournisseurs qui se situent dans des régions à faible densité de points à livrer afin de réduire le coût du transport.

Au niveau des réseaux de distribution, (Groothedde et al., 2005) introduisent le concept de l'**hub collaboratif** pour plusieurs chargeurs différents afin de massifier les flux. Un autre avantage ciblé est que les flux massifiés peuvent être transportés par des modes de transport à

fort volume par exemple le transport fluvial. En conséquence, le problème devient une conception des réseaux avec un hub intermodal. A travers une étude de cas, les auteurs montrent que le réseau avec un hub collaboratif intermodal peut réduire le coût du transport de 17,37 €/palette à 15,03 €/palette sur les trajets considérés.

Dans la littérature, le concept de la mutualisation est partiellement étudié et peu de travaux traitent du problème de la conception de réseaux mutualisés au niveau de la chaîne d'approvisionnement dans son ensemble. De ce fait, dans les paragraphes suivants nous allons d'abord définir la mutualisation, spécialement au niveau du transport dans le contexte de la grande distribution, puis identifier les principes de la mutualisation.

2.2.2.2 Définition de la mutualisation logistique en transport

Pour mieux comprendre le concept de la mutualisation, nous pouvons d'abord nous référer à la définition de la mutualisation des services urbains en France :

« La mutualisation des services met en commun des moyens, équipements matériels ou personnels, au sein d'une communauté urbaine, d'une communauté d'agglomération ou d'une communauté de communes. Ce sont des services administratifs ou techniques partagés entre plusieurs collectivités territoriales membres d'une même communauté ou Établissement public de coopération intercommunale (EPCI). Les responsables de service mutualisé reçoivent leurs instructions des différents exécutifs. » (Source : Wikipédia¹⁶)

Concrètement, la mutualisation urbaine a été décrite comme une démarche d'un partage des ressources entre plusieurs collectivités. L'objectif n'y est pas précisé dans la citation ci-dessus mais on peut faire l'hypothèse que cette démarche recherche à mieux utiliser les ressources disponibles pour atteindre des objectifs communs.

Au niveau anglo-saxon, on utilise souvent la terminologie de « pooling » que le *Council of Supply Chain Management Professionals* décrit comme : « *A shipping term for the practice of combining shipment from multiple shippers into a truckload in order to reduce shipping charges* ». Cette définition qui se concentre uniquement sur le transport est aussi une démarche de consolidation.

¹⁶ http://fr.wikipedia.org/wiki/Mutualisation_des_services

Afin de montrer que le concept de mutualisation est plus large que la vision proposée par la notion de pooling, nous avons repris deux terminologies « *merging supply chains* » et « *pooling supply chains* » (Ballot et Fontane, 2010). Cette distinction n'est pas uniquement sémantique, elle permet de souligner que nous nous intéressons à la mutualisation des chaînes logistiques. Ainsi nous proposons la définition suivante :

La mutualisation logistique, correspond à la co-conception, par des acteurs ayant un objectif commun, d'un réseau logistique dont les ressources sont mises en commun (entrepôts, plateformes, moyens de transport, etc.) afin de partager des schémas logistiques, ainsi que la mise à disposition à un ou des tiers des données nécessaires à la gestion. Il s'agit d'une coalition à moyen/long terme destinée à améliorer la performance logistique sur plusieurs de ses dimensions : utilisation des ressources, fréquence... Par la recherche d'un objectif commun et des implantations proches, la mutualisation convient à des chaînes logistiques qui opèrent dans les mêmes filières. C'est une démarche qui par son efficacité peut rencontrer les préoccupations du développement durable.

Cette définition suppose que, premièrement, la mutualisation s'inscrive dans **une relation gagnante** pour chacun des membres de la coalition pour qu'elle rencontre la motivation des acteurs quant au partage des ressources (moyens de transport, plateformes, entrepôts, etc.) et des informations logistiques vers un tiers. Cette relation est particulièrement importante, car elle visent à compléter la collaboration verticale (le cas actuel) mais aussi particulièrement sur **la coopération horizontale** (Cruijssen et al., 2007), autrement dit la collaboration entre concurrents. Ainsi, la mutualisation consiste à faire intégrer les acteurs indépendants (fabricants, prestataires, distributeurs) dans l'objectif de concevoir un réseau logistique en commun. Un tel réseau mutualisé permet aux acteurs de dépasser les contraintes issues de la relation verticale unique : satisfaire chacun les demandes de clients en maintenant la productivité de la logistique.

Deuxièmement, la mutualisation vise **une collaboration stratégique à long terme**. Par rapport aux différentes démarches de consolidation opportunistes et locales, la mutualisation est une démarche stratégique réalisée par des partenariats cohérents entre les membres. Un partage des informations logistiques, par exemple la GPAM (Gestion Partagée des Approvisionnements Mutualisés) étant ensuite nécessaire pour mieux utiliser les ressources mises en commun. De ce fait, le choix des partenaires lors de la construction de la coalition

est une décision stratégique et critique car il s'agit d'une collaboration à long terme (Harrison et Hoek, 2005).

Enfin, nous soulignons que la mutualisation des chaînes logistiques est une démarche qui peut **s'opérer sur les ressources existantes**. Cela permet notamment de réduire le coût d'implantation de l'infrastructure. Ceci dit, les flux des partenaires ne sont pas systématiquement mutualisés, mais sont massifiés dans les sites mutualisés en fonction de la proximité géographique d'expédition ou de destination si et seulement si c'est globalement pertinent. La perspective reste cependant à l'intégration : plus les ressources sont mises en communs, plus les possibilités pour mutualiser les flux sont présentes et plus la performance logistique est améliorée.

2.2.2.3 Identification des principes de la mutualisation

Comme la définition l'indique, la mutualisation est la mise en commun des ressources auprès d'un tiers entre les donneurs d'ordres (fournisseurs ou distributeurs) et d'informations logistiques. Elle modifie les décisions à plusieurs niveaux, voire la Figure 2.10. Le management du transport comprend plus d'activités que celles qui sont présentées dans cette figure, nous nous concentrerons ici sur les décisions les plus importantes pour mettre en pratique la mutualisation.

Au niveau stratégique, la construction de la coalition et la définition des règles de gestion en commun sont les deux démarches essentielles pour démarrer la mutualisation. Elles consistent à chercher des partenaires à long terme et à convenir des accords sur la collaboration, par exemple sur le partage des moyens, le partage des coûts et les gains, les niveaux de prestation, le règlement des litiges, etc. Une fois que la coalition est identifiée, elle peut ensuite identifier les ressources existantes des membres et cartographier les besoins, puis concevoir le réseau de distribution en commun pour réaliser la coalition. Les décisions tactiques sur le transport sont essentiellement la planification des transports dans le réseau mutualisé défini et l'actualisation des plans. L'optimisation des tournées est une décision entre le niveau tactique et le niveau opérationnel, car elle dépend à la fois de la localisation des ressources et des contraintes pour satisfaire les demandes données. Au niveau opérationnel, les décisions portent sur l'ordonnancement des transports en prenant en compte les contraintes opérationnelles et, enfin, l'exécution des plans.

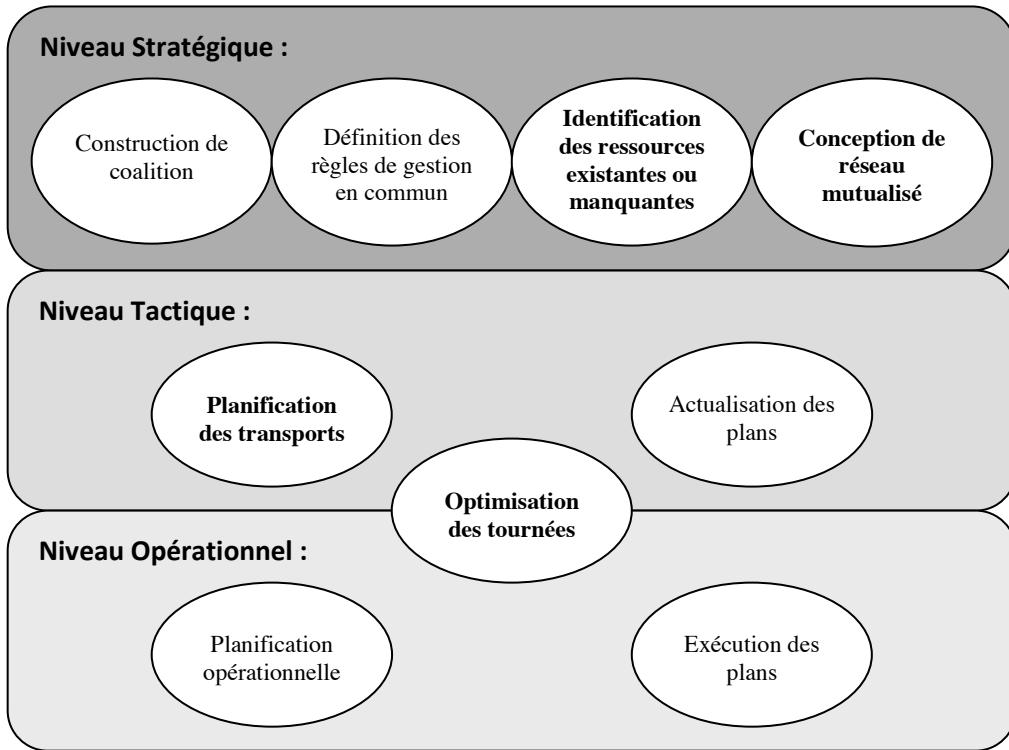


Figure 2.10 : Activités principales du management de la mutualisation en transport

Parmi les activités principales pour la mise en œuvre de la mutualisation en transport, ce travail se concentre sur celles en gras de la Figure 2.10, spécialement la tâche de **la conception du réseau mutualisé**. A cette fin, nous avons construit des modèles d'aide à la décision soumis à un critère environnemental : la minimisation des émissions du transport.

Au niveau de la gestion des flux dans le réseau mutualisé, cinq principes pour transporter les flux sont élaborés et testés. Il s'agit de principes pour concevoir un réseau mutualisé :

1. Mutualisation des entrepôts fournisseurs par famille produit. Ce principe consiste à regrouper les flux compatibles (poids, condition de transport, température, etc.) au niveau de stockage ou transport (ex : liquides, épicerie, etc.).
2. Mutualisation des entrepôts fournisseurs par proximité géographique des expéditions, dans le but de faire la mutualisation en amont entre fournisseurs. Le critère géographique dénote que les expéditions depuis une même zone sont recherchées.
3. Mutualisation des plateformes distributeurs par proximité géographique des livraisons. Par rapport au deuxième principe, celui-ci vise la mutualisation en aval entre distributeurs. Autrement dit, les points de vente dédiés à différents

distributeurs qui se situent dans une même zone géographique sont probablement servis par la plateforme même mutualisée.

4. Mutualisation des moyens de transport, qui a pour but la mise en commun des moyens de transport qui servent les membres de la coalition.
5. Mutualisation des schémas logistiques, qui consiste à définir les chemins logistiques en commun pour les donneurs d'ordres en partenariat.

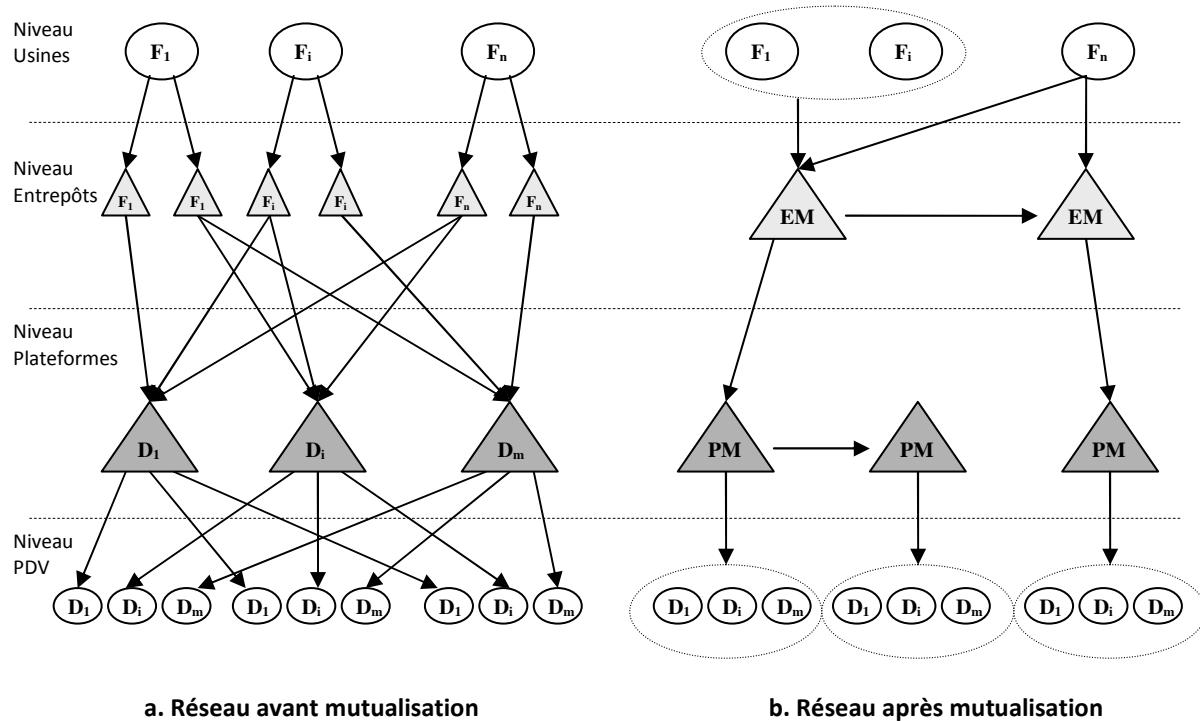


Figure 2.11 : Exemple d'application des principes de la mutualisation des réseaux logistiques

La Figure 2.11 dessus est un exemple d'illustration de la mutualisation sur un réseau logistique classique à trois échelons : usines-entrepôts, entrepôts-plateformes et plateformes-PDV (Points de Vente). F_x et D_x désignent respectivement les fournisseurs et les distributeurs dans la coalition (n fournisseur et m distributeurs). EM et PM sont respectivement les abréviations d'Entrepôt Mutualisé et de Plateforme Mutualisée.

Sur l'exemple illustré dans la Figure 2.11, les fournisseurs possèdent chacun deux entrepôts nationaux qui livrent les plateformes de chaque distributeur selon le critère géographique. Avant la mutualisation, les entrepôts sont dédiés aux clients, de même pour les plateformes des distributeurs, selon l'organisation verticale de la logistique aujourd'hui.

Après avoir mutualisé les réseaux, les entrepôts sont mis en commun et sont alors devenus des entrepôts mutualisés entre les fournisseurs. Ainsi, les flux des fournisseurs peuvent se réunir en dépassant la « frontière » organisationnelle pour réaliser la massification des flux. En plus, les communications de flux entre entrepôts en amont ou entre plateformes en aval permettent d'améliorer les transports entre entrepôt et plateforme qui sont globalement à fort volume et à longue distance. De façon comparable avec le cas en amont, les plateformes mutualisées en aval ont pour objectif de livrer les points de vente des distributeurs par zone géographique. Autrement dit, les PDV géographiquement proches possédés par différents distributeurs sont servis par la même plateforme, comme le montre l'illustration. Evidemment, la mutualisation ajoute éventuellement des trajets supplémentaires comme le passage entre plateformes, mais cela est justifié par l'objectif global d'amélioration de la productivité du réseau.

En plus, il faut savoir que les **flux directs (ex : usine-plateforme/PDV ou entrepôt-PDV)** ne sont pas exclus au niveau de la conception des réseaux, quoique ces trafics ne soient pas illustrés dans la Figure 2.11.

L'illustration de la Figure 2.11 est un exemple sur le réseau mutualisé qui pourra être réalisé par un modèle d'aide à la décision. A cet effet, nous présenterons ces modèles dans le Chapitre 4 puis leur application sur deux études de cas aux Chapitre 5 et Chapitre 6.

Afin de tester les principes, la grande distribution alimentaire en France est retenue comme secteur d'étude. C'est pourquoi, dans le paragraphe suivant nous allons montrer l'état des lieux ce secteur, ainsi que deux mutations importantes qu'il a connu : l'externalisation des fonctions logistiques et la centralisation des stocks.

2.3 Terrain d'étude : la grande distribution en France

En France, la grande distribution, dans son format actuel existe depuis plus de quarante ans (le premier hypermarché français a été ouvert en 1963) et elle s'est rapidement développée comme une activité économique importante. Comme l'illustre la Figure 2.12 issue du site de la FCD¹⁷, le chiffre d'affaires des groupes de distribution français est en croissance stable depuis 2000. En particulier, après la fusion avec PROMODES en 2000, le groupe Carrefour est devenu le premier distributeur national et le deuxième mondial. Aujourd'hui, 80% de distribution alimentaire française est opéré par sept groupes qui sont les six dans la Figure

¹⁷ Fédération des Entreprises du Commerce et de la Distribution <http://www.fcd.asso.fr/index.php?page=14>

2.12 plus Louis Delhaize-Cora. De plus, l'offre des PGC (Produits de Grande Consommation) alimentaires en grande surface est supérieure à 12 000 références fin 2008, soit +10% par rapport au niveau en 1999 (Source FCD). La grande distribution a donc connu une croissance importante du nombre des références sans que le CA augmente en proportion.

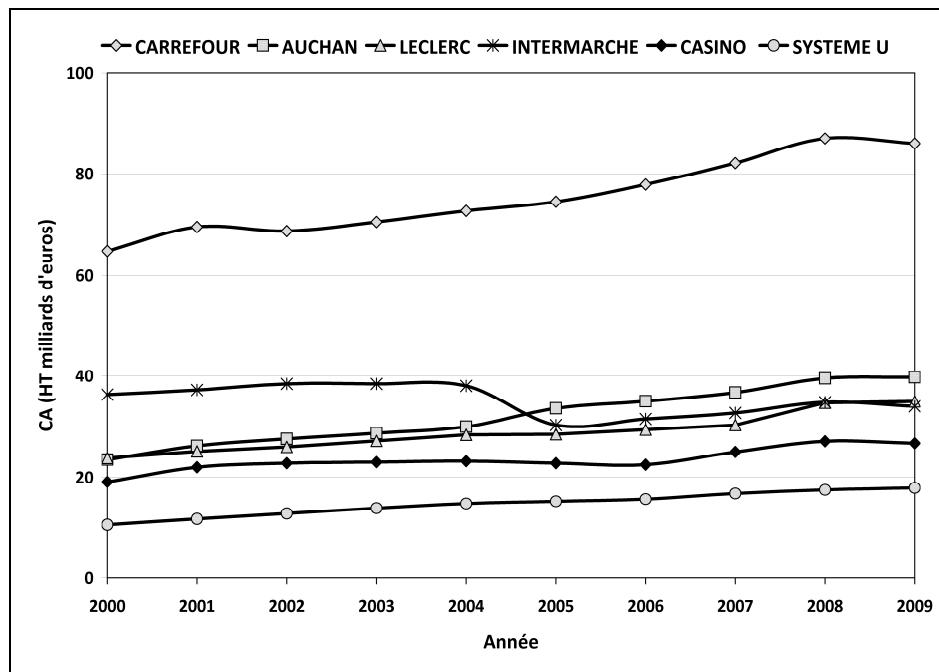


Figure 2.12 : Chiffres d'affaires des distributeurs alimentaires français (HT milliards d'euros)
 (Source : FCD, chiffres 2010)

Vu l'accroissement en taille de la grande distribution, la relation de pouvoir entre producteurs et distributeurs s'est inversé au fil du temps (Allain et Chambolle, 2003). Contrairement à la situation antérieure où les fabricants étaient en position dominante vis-à-vis du commerce, aujourd'hui le secteur industriel est obligé d'adapter sa stratégie en tenant compte de la distribution. De plus, la naissance des centrales d'achat¹⁸ a considérablement augmenté la puissance de négociation des distributeurs. Actuellement près de 95% du CA (Chiffre d'affaires) du secteur de la grande distribution est réalisé par les 5 (ou 6 dans l'article (Messeghem, 2003b)) grandes centrales d'achat en France. Le pouvoir de négociation des industriels s'est donc réduit (prix, fréquence de livraison, etc.) avec les grands distributeurs. Pour les PME fournisseurs des enseignes, le problème est encore plus important (Messeghem, 2003b). En effet, ces PME sont interchangeables pour les distributeurs, car, d'une part elles peuvent fournir un assortiment original conformément à la stratégie de différenciation des

¹⁸ Définition issue du site Wiki : Une centrale d'achat est une organisation ayant pour objet de regrouper les commandes d'un ensemble de membres. La structure offre à la fois, de meilleures conditions d'achat (grâce aux économies d'échelle) et les services de promotion pour l'ensemble des membres (http://fr.wikipedia.org/wiki/Centrale_d'achat)

distributeurs, et d'autre part elles fabriquent de plus en plus de Marque de Distributeur pour ces mêmes enseignes. Cependant, la relation entre eux et distributeurs n'est pas toujours stable à cause des faibles flux et leur substituabilité. Donc, les PME n'ont pas une forte puissance de négociation avec les distributeurs.

Il est aussi à noter que la logistique a accru son rôle et son importance depuis les années 80 dans les organisations commerciales. C'est une grande opportunité pour réduire le coût total. Par exemple, grâce à un système logistique performant, l'initiateur du principe du Cross-Docking, Wal-Mart, est capable de fournir des marchandises avec un coût plus bas que ses concurrents. Cet avantage sur le coût des produits associé au poids de sa centrale d'achat lui permet d'être toujours le leader mondial de la grande distribution. On peut donc se rendre compte que la logistique est un des éléments clés du succès dans ce domaine. Elle est également une voie d'interdépendance entre fournisseurs et distributeurs. C'est la raison pour laquelle les membres de chaque chaîne peuvent être à la recherche d'une collaboration plus approfondie avec leurs partenaires pour définir une relation « gagnant-gagnant » à long terme.

Dans ce travail de recherche, nous nous intéressons principalement au secteur de GDA (Grande Distribution Alimentaire). La raison en est que, selon l'enquête sur les points de vente du commerce de détail en 2004 (Source : INSEE, « Commerce de Détail »¹⁹), sur l'ensemble des 32 400 PDV (Points De Vente) nationaux de « 400 m² et plus », 70% de leur CA (Chiffre d'Affaires) total et 61% de l'emploi provient de l'alimentaire. C'est pour quoi ce secteur est retenu comme terrain d'étude.

De façon générale, la chaîne logistique de la grande distribution française est composée de trois-échelons, comme le montre la Figure 2.13 (Ballot et Fontane, 2010). Sachant que la majorité des sites de production se situe en France et la minorité en Europe, la chaîne logistique alimentaire est donc une chaîne très majoritairement nationale. Ces usines nationales ne portent pas de stock (ou très peu en raison de lot de production ou de transport) car les produits finis sont souvent immédiatement livrés vers un ou des entrepôts (WH : *Warehouse*) où les produits venus de différentes usines sont stockés et où la gamme est reconstituée. Ensuite, la gamme des produits est transportée vers les plateformes ou les centres de distribution régionaux (DC : *Distribution Centre*) du distributeur qui servent les points de vente (P) desservis. Dans l'organisation actuelle, chaque fournisseur n'a qu'un ou peu d'entrepôts nationaux mais chaque distributeur possède un ensemble de plateformes

¹⁹ http://www.insee.fr/fr/themes/document.asp?ref_id=pointsvente04#p2

régionales. Les entrepôts et les plateformes sont souvent gérés par les prestataires en amont comme en aval et indépendamment les unes des autres.



Figure 2.13 : Exemple d'une chaîne logistique alimentaire en France (de fournisseur à distributeur) (Ballot et Fontane, 2010)

La forme de la chaîne logistique montrée dans la Figure 2.13 est le résultat de plusieurs évolutions, comme le montre l'étude de l'OCDE²⁰ (OECD, 2002). Par rapport au contexte du travail lié à la mutualisation, il est utile de développer deux évolutions de la logistique dans ce secteur : l'externalisation de fonction logistique et la centralisation des stocks.

2.3.1 Externalisation des fonctions logistiques

Externaliser la branche logistique est donc une tendance commune dans la grande distribution. Comme son nom l'indique, l'externalisation logistique signifie que les entreprises, les industriels ou les distributeurs externalisent leurs fonctions logistiques à des 3PL, notamment le transport, l'entreposage et la préparation de commande (Uhlig et Gélinas, 1996). Ce mouvement permet aux entreprises de se concentrer sur leur cœur de métier et de transférer les opérations logistiques aux prestataires. La Figure 2.14 ci-après montre une progression stable de l'externalisation de la fonction logistique en Europe de 2000 à 2003. Et la tendance se poursuit (Becker, 2003). La France est en deuxième position en Europe juste après le Royaume-Uni. Par exemple, selon le constat de l'ASLOG (Source : Benchmark ASLOG 2008/2009), le niveau d'externalisation du transport en France est de 84% en 2008 par rapport à 78% en 2001. La différence du niveau d'externalisation de stockage est plus évidente, 40% en 2008 contre 15% en 2001.

²⁰ Organisation de coopération et de développement économiques, ou *Organisation for Economic Co-operation and Development*, <http://www.oecd.org/>

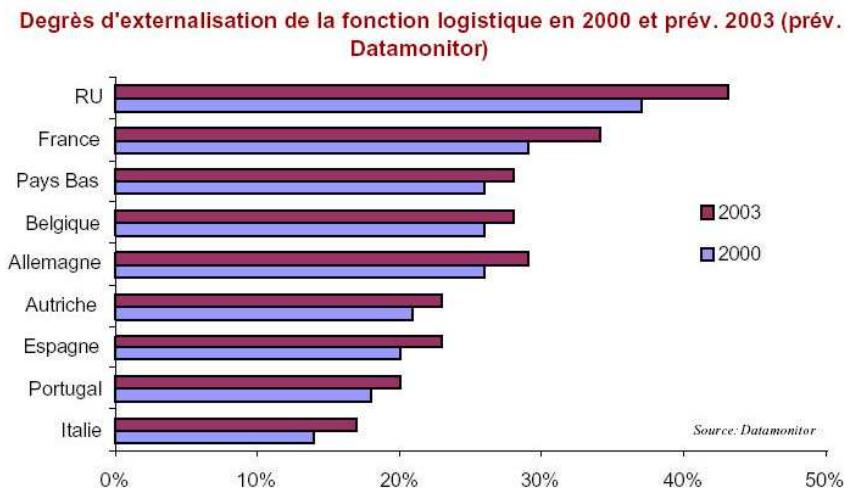


Figure 2.14 : Degré d'externalisation logistique en Europe (data issus de Datamonitor présentés dans (Becker, 2003))

D'ailleurs, le mouvement d'externalisation logistique a conduit à l'émergence d'un nouvel acteur : le prestataire logistique 3PL (*Third-Party Logistics*) (Artous, 2003). Les prestataires s'occupent, outre du transport et du stockage, de plus en plus de la coordination d'informations sur la gestion des flux entre amont et aval dans la chaîne par exemple de la grande distribution. Ils sont donc devenus des coordinateurs de flux et non plus simplement un transporteur vis-à-vis du chargeur (Maillet, 2010).

Le concept de 4PL n'est pas toujours identique dans la littérature. Par exemple, il a été la première fois défini par le cabinet de conseil américain, *Accenture*, comme « *un intégrateur qui assemble ses propres ressources, capacités et technologies et celles d'autres prestataires pour concevoir et piloter des Supply Chains complexes* » (citée dans (MEEDDM, 2010b)). Récemment, (Cruijssen, 2006) propose dans sa thèse la définition suivante : « *A 4PL concept represents a situation where even the management of logistics activities is outsourced. The 4PL focuses entirely on this management task and therefore generally does not own logistics assets. This concept becomes beneficial if the 4PL manages multiple supply chains amongst which synergies can be exploited* ». Cruijssen souligne que le 4PL est de fait un service logistique au niveau du management entre plusieurs chaînes logistiques. La définition issue de Van Hoek et Chong et présentée dans (Selviaridis et Spring, 2007) est un peu différente : le 4PL est « *a supply chain service provider that participates rather in supply chain co-ordination than operational services. It is highly information based and co-ordinates multiple asset-based players on behalf of its clients* ». Cela met en évidence la coordination et la

gestion de l'information entre les membres dans la chaîne. D'ailleurs, en comparaison avec le 3PL, le *Council of Supply Chain Management Professionals*²¹ :

«(a) 4PL organization is often a separate entity established as a joint venture or long-term contract between a primary client and one or more partners; (b) 4PL organization acts as a single interface between the client and multiple logistics service providers; (c) All aspects (ideally) of the client's supply chain are managed by the 4PL organization; (d) It is possible for a major third-party logistics provider to form a 4PL organization within its existing structure.»

(CSCMP, 2010)

S'appuyant sur ces définitions, on voit que le 4PL, par rapport au 3PL, accentue son rôle de fournisseur de service informatique pour coordonner les flux entre plusieurs chargeurs et clients. L'objectif est d'améliorer la coordination par exemple entre un ensemble de fournisseurs ou/et de distributeurs afin de trouver des synergies. Par rapport aux prestataires de type 3PL, les 4PL ne possèdent pas nécessairement les moyens ou les infrastructures pour le transport mais gèrent les flux par un système informatique et coordonnent les opérations réalisées par d'autres entreprises.

De fait, l'émergence du métier de 4PL est un éclairage sur la collaboration logistique. Dans ce cas, le rôle du 4PL est particulier car il se pose en coordinateur de flux pour ses clients. En conséquence, la collaboration verticale parmi les membres d'une chaîne logistique peut être complétée par les synergies apportées par les 4PL. Les bénéfices de ces synergies sont les principales raisons d'être de ces 4PL qui peuvent alors en rétrocéder une partie à leur client.

2.3.2 Centralisation des stocks

Quand on regarde l'histoire de la grande distribution particulièrement sur les produits alimentaires en France, il est facile de remarquer la disparition de petits entrepôts régionaux et l'accroissement du nombre de grands centres de distribution nationaux (Dornier, 1997). Autrement dit, la centralisation des stocks est une tendance à long terme pour la majorité des industriels. La raison en est que cette organisation qui conduit à une économie d'échelle offre plusieurs bénéfices, principalement sur la gestion de stock, comme le montre l'exemple de Yoplait dans l'Encadré 2.

²¹ <http://cscmp.org/digital/glossary/glossary.asp>

Pour la centralisation des stocks chez Yoplait, Dornier a identifié dans sa thèse les quatre grandes étapes entre 1960 et 1995. Initialement de 1960 à 1980, le système logistique est relativement stable, la majorité de livraisons est réalisée en transport direct à partir des dépôts des usines Yoplait vers les magasins. Ces livraisons sont réalisées par une flotte de camions en propre. Pendant les quatre années suivantes, les premiers entrepôts distributeur sont apparus ayant pour objectif de consolider les différents flux destinés à des points de vente en aval. En même temps, les livraisons directes d'usine vers les hypermarchés commencent à se former. La conséquence est que le nombre des entrepôts régionaux a tendance à réduire. Ensuite de 1984 à 1986, le système est de plus déstabilisé en raison de la spécialisation des unités de production en amont et de la multiplication des livraisons directes ou via plateforme distributeur. Le nombre de dépôts régionaux est de plus réduit en faveur d'un nombre limité de dépôts centraux. La dernière étape sur la période 1986-1995 est caractérisée par la forte croissance de l'utilisation des entrepôts distributeur. En chiffre, le taux de tonnage vendu par Yoplait passant par plateforme est de 72% fin 1993 par rapport à 25% en 1987 et à 15% en 1980.

Jusqu'à présent, il existe encore les trois démarches de livraisons dans le système logistique de Yoplait : livraison directe usine-magasin, usine-plateforme distributeur, ou entrepôt centraux-plateforme distributeur. Mais, le canal entrepôt-plateforme est le plus important pour leur distribution.

Encadré 2 : Exemple de l'évolution sur la centralisation des stocks : Yoplait pendant les années 1960-1995 (Dornier, 1997)

L'exemple de Yoplait discuté par (Dornier, 1997) illustre comment la centralisation des stocks a évolué au niveau des producteurs. Afin de comprendre la situation pour les distributeurs en aval, prenons un autre exemple discuté dans (Harrison et Hoek, 2005) sur le cas de Nike. En tant que grande marque internationale de matériels de sport, Nike possède une grande part de marché en Europe. Au niveau de la distribution, tout au début, la compagnie avait élaboré une stratégie qui consistait à choisir des partenaires de distribution locaux dans chaque pays. En raison de la croissance des différents marchés et du manque de coordination entre les entrepôts nationaux, des problèmes sont apparus, par exemple un type de produit qui est en pénurie dans un pays est souvent en surstock dans l'entrepôt d'un autre pays, et vice et versa. Ce problème est accentué par le fait que la plupart des entrepôts atteignaient leur capacité maximale de stockage. En conséquence, au début des années 1990, Nike a décidé de consolider les stocks de ses 22 entrepôts nationaux en Europe dans un seul centre de distribution européen, l'EDC (*European Distribution Centre*) à Laakdal en Belgique. Le

résultat constaté est que la compagnie a pu maintenir sa grande part de marché par la disponibilité de son assortiment. Depuis 1994, ce centre est toujours en service pour assurer la couverture sur toute l'Europe.

Par contre, il est important de souligner que la centralisation des stocks peut dégrader l'efficacité de la distribution, puisque la plupart des marchandises centralisées se situent plus loin des marchés à livrer. De ce fait, un coût lié à un temps de transport supplémentaire est à prendre en compte dans la valorisation des activités de distribution.

Dans cette partie nous avons donc souligné l'organisation de la grande distribution en France et discuté de deux phénomènes représentatifs, l'externalisation de la fonction logistique et la centralisation des stocks, ainsi que le rôle des prestataires. Nous avons vu que la coordination est éventuellement verticale (des fournisseurs vers les distributeurs) et que les prestataires (3PL) fournissent éventuellement les moyens de cette coordination. La prestation de type 4PL sera une source d'amélioration mais elle reste très marginale et n'implique pas de coordination dans les chaînes logistiques. C'est dans ce contexte que nous proposons la mutualisation pour améliorer la performance de la chaîne de la grande distribution.

2.4 Conclusion

Ce chapitre a pour but de montrer l'intérêt d'appliquer le concept de « mutualisation » à la chaîne logistique. Pour ce faire, nous avons d'abord montré les problématiques de la logistique actuelle, à travers l'analyse du transport de marchandises et de son importance économique et logistique. Comme on l'a précisé, les mutations logistiques induisent non seulement une forte croissance de la demande de transport, mais aussi des contraintes importantes sur le transport, telles que des fréquences de livraison élevées et des flux en faible volume à expédier. Ainsi, l'efficacité du transport de marchandises s'est mécaniquement dégradée. A ce propos, nous avons montré que ces contraintes antagonistes sont difficiles à dépasser par les solutions actuelles, car elles se basent essentiellement sur une relation verticale dans les chaînes logistiques. C'est pourquoi, la mutualisation qui traite davantage de la coopération horizontale, est proposée pour améliorer ces schémas logistiques. Afin d'étudier ce principe, nous avons en premier lieu donné la définition de la mutualisation puis identifié les principes de mise en œuvre pour concevoir un réseau mutualisé. Ces principes seront appliqués et testés dans les études de cas basées sur le secteur de la grande distribution

pour en évaluer la performance. En effet, il existe que très peu d'expérimentation du concept à ce jour.

Quoique la conséquence de la mutualisation soit étudiée dans cette thèse au niveau du transport, il est nécessaire d'indiquer que ce principe a d'autres répercussions sur les activités logistiques par exemple l'achat, le stockage, l'approvisionnement, etc.

Parmi les activités logistiques, le transport de fret est le sujet étudié dans cette thèse, car, d'une part, il joue un rôle indispensable dans la chaîne logistique et représente une partie importante des coûts logistiques, d'autre part, cette activité rencontre une contrainte importante liée au développement durable : les émissions de Gaz à Effet Serre. Le prochain chapitre sera donc consacré aux problématiques du transport face au développement durable, en se focalisant notamment sur le problème des émissions.

Chapitre 3. Logistique durable : contribution à la minimisation des émissions de GES

Dans le chapitre précédent nous avons discuté du problème de l'accroissement du transport issu des transformations de la logistique. Ce chapitre se propose de montrer que cet accroissement conduit à une préoccupation importante au niveau du développement durable.

« Moins de camions complets, et de petits lots tous les jours, cela ne va pas dans le sens d'une démarche de développement durable », reconnaît Didier Thibaud, directeur Supply Chain France de Carrefour et président de l'association du Club Déméter Environnement et Logistique (Rognon, 2009). Cette citation est très pertinente pour montrer que le transport de fret a un impact non négligeable sur le développement durable. En effet, le transport génère de plus en plus de problèmes environnementaux, tels que les émissions de Gaz à Effet de Serre (GES), la congestion du trafic, le bruit, etc. Ce point est particulièrement préoccupant alors que l'on constate l'accroissement du transport et la dégradation de l'efficacité du transport, comme le chapitre précédent l'a montré.

Afin d'identifier les problématiques environnementales du transport de fret, nos analyses sur le transport vont se concentrer sur deux problèmes : la consommation d'énergie et les émissions de GES, qui sont de fait, deux sujets très interdépendants. Nos constats vont montrer que ces problèmes doivent être intégrer dans les activités de gestion de la chaîne logistique. Cela induit donc une nouvelle dimension au SCM (*Supply Chain Management*) : la logistique durable. Notamment, il s'agit d'identifier les leviers d'action qui pourront contribuer à réduire les émissions de GES²². Notre recherche s'inscrit dans cette thématique en se fixant pour objectif la conception de réseaux logistiques qui minimisent les émissions de CO₂ (principal GES) dues au transport de marchandises. Nous soulignerons néanmoins qu'il existe d'autres pistes non exclusives pour réduire les émissions de GES liés au transport.

²² Comme nous allons appliquer ce travail aux émissions de CO₂ liées au transport de fret, il est nécessaire de préalablement avertir que les valeurs sur les émissions de CO₂ disponibles dans la littérature sont souvent calculées selon différentes manières. Ainsi, les résultats obtenus sont hétérogènes. Les différences se font par exemple sur la méthodologie (statistique ou analytique), sur le périmètre (moyen national ou spécifique à des études de cas), ou encore sur les unités d'œuvre (CO₂, équivalent CO₂, ou équivalent Carbone, on peut se référer au chapitre de modélisation pour distinguer ces différences). Donc ces résultats sont pour ainsi dire incomparables. En conséquence, dans ce chapitre, ainsi que dans cette thèse, nous ne comparons que des valeurs obtenues selon la même méthodologie et mesurées en recourant à la même unité.

Pour commencer, nous présentons brièvement le concept de développement durable et la situation actuelle en France, en se focalisant principalement sur la dimension environnementale.

3.1 Le développement durable

A partir des années 1990, ce terme a retenu beaucoup d'attention dans toutes les activités humaines. Le domaine du SCM est de toute évidence un des secteurs concernés. Mais avant d'introduire son impact sur la logistique, nous allons d'abord en donner une définition générale et aussi souligner l'importance du pilier environnemental.

3.1.1 Définition générale

Le concept Développement Durable (*Sustainable Development*) a été pour la première fois mentionné lors de la création du Club de Rome²³ en 1968 en intégrant uniquement une dimension économique. Puis, en 1972, le rapport « *The limits to growth* » dirigé par une équipe de recherche du *Massachusetts Institute of Technology* est publié par ce club. Ce rapport s'appuyait sur les résultats de simulations informatiques jusqu'en 2100 des conséquences de la croissance économique sur l'exploitation des ressources naturelles. Le résultat était que « la poursuite de la croissance économique entraînera au cours du XXIe siècle une chute brutale des populations à cause de la pollution, de l'appauvrissement des sols cultivables et de la raréfaction des énergies fossiles » (Informations sur Wikipédi²⁴). Ainsi, le problème environnemental était pour la première fois introduit dans l'économie. A la suite de ce rapport, l'interdépendance entre économie et écologie a énormément fait débat. Cela a conduit à un nouveau concept, le développement durable qui a été officiellement défini dans le Rapport Brundtland publié par la Commission mondiale sur l'environnement et le développement (*United Nations World Commission on Environment and Development, WCED*) en 1987 :

« *Le développement durable est un mode de développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs. Deux concepts sont inhérents à cette notion : le concept de «besoins», et plus particulièrement des besoins essentiels des plus démunis, à qu'il convient d'accorder la*

²³ www.clubofrome.org

²⁴ http://fr.wikipedia.org/wiki/D%C3%A9veloppement_durable

plus grande priorité, l'idée des limitations que l'état de nos techniques et de notre organisation sociale impose sur la capacité de l'environnement à répondre aux besoins actuels et à venir. » (WCED, 1987)

Selon cette définition, deux mots clés peuvent être identifiés : le développement et la durabilité. Le développement signifie que les activités actuelles doivent satisfaire les besoins du présent et avoir la capacité de répondre à ceux du futur. Cependant, ces activités sont conditionnées par un autre principe : la durabilité. Cette contrainte est une manière de s'assurer que le développement soit capable de se dérouler à long terme, mais pas simplement sur une courte période. C'est la raison pour laquelle le sujet du « Développement Durable » a été beaucoup examiné dans tous les domaines depuis les dernières années. Il est devenu un problème au niveau des Etats et touche également les entreprises. Le terme Développement Durable peut s'analyser selon trois dimensions : sociale, économique et écologique, voir la Figure 3.1.

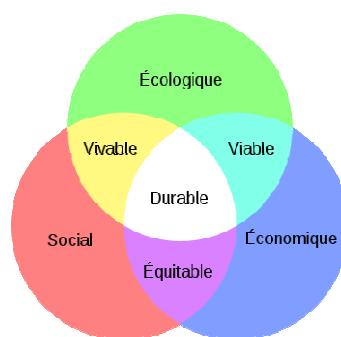


Figure 3.1 : Les trois piliers du développement durable

En 2001, la Commission Européenne mentionne dans un livre vert que la responsabilité sociale des entreprises est définie comme « *l'intégration volontaire des préoccupations sociales et écologiques des entreprises à leurs activités commerciales et leurs relations avec leurs parties prenantes* » (Commission Européenne, 2001b). Cela indique que les entreprises ne doivent pas se focaliser uniquement sur la dimension économique (Aggeri et al., 2005). Afin de concilier ces trois aspects, il est nécessaire d'inclure au niveau du management des outils d'aide à la décision cohérents avec cette préoccupation. C'est à cette problématique que ce travail de recherche cherche à contribuer.

Parmi ces préoccupations, les problèmes tels que la surexploitation des ressources naturelles, le réchauffement planétaire ou encore la pollution de l'air, sont clairement devenus des axes de recherche dans lesquelles, les Etats, les collectivités territoriales, les entreprises

s'engagent de plus en plus afin d'accroître leur responsabilité environnementale. C'est ainsi que cette thèse a été financée par le programme R2DS de la région Ile-de-France et a reçu le soutien d'entreprises. Pour mieux comprendre cette motivation, il sera illustré dans la partie suivante l'état des lieux sur l'exploitation de l'énergie et sur la pollution par gaz à effet de serre, notamment du CO₂ en France, puis nous identifierons les objectifs de réduction des émissions.

3.1.2 Accent sur les problèmes environnementaux

3.1.2.1 Panorama français

Les impacts environnementaux issus des activités humaines sont divers et très dépendants des secteurs. Pour le transport, nous nous focaliserons essentiellement sur deux problématiques : l'exploitation des ressources énergétiques et l'effet de serre. D'abord nous commençons par des chiffres représentatifs de l'état actuel de la France, qui seront suivis par la présentation des objectifs, essentiellement ce que l'on nomme le « Facteur 4 ».

- **Exploitation des ressources énergétiques**

La Figure 3.2 montre la situation de la consommation d'énergie sur la période de 1970 à 2008 en France (SOeS, 2009). On peut constater que la consommation énergétique en France s'est accrue de façon très sensible, 273,6 Mtep (Millions tonne d'équivalent pétrole) en 2008 contre 150 Mtep en 1970 avec un pic en 2006 de 274,5 Mtep, soit un taux de croissance de 80% en 38 ans. En même temps, la consommation absolue de pétrole reste assez stable mais pèse relativement moins lourde par rapport à la totalité de l'énergie consommée.

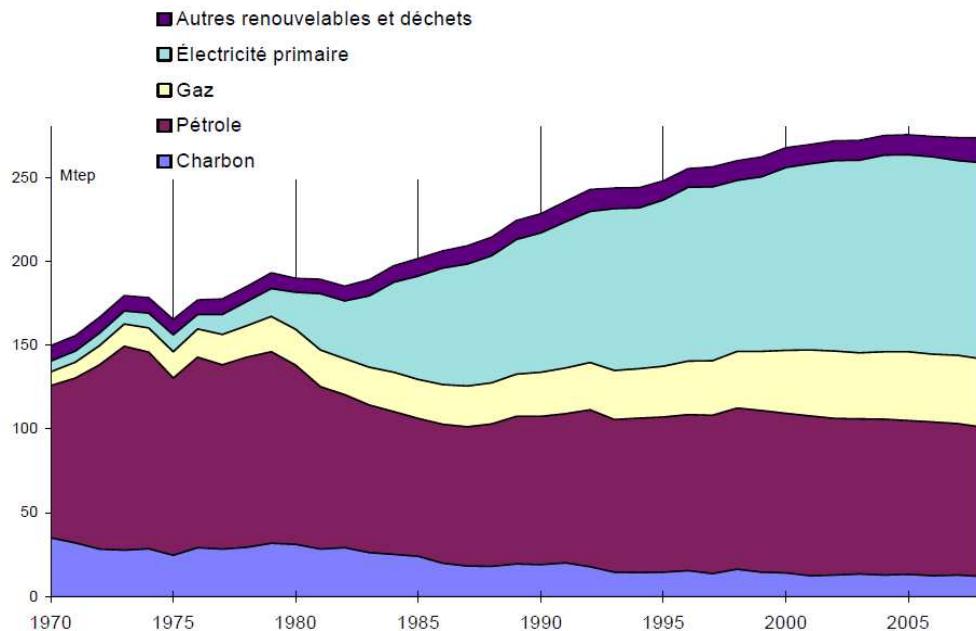


Figure 3.2 : Evolution de la consommation d'énergie primaire corrigée du climat (en Mtep) (SOeS, 2009)

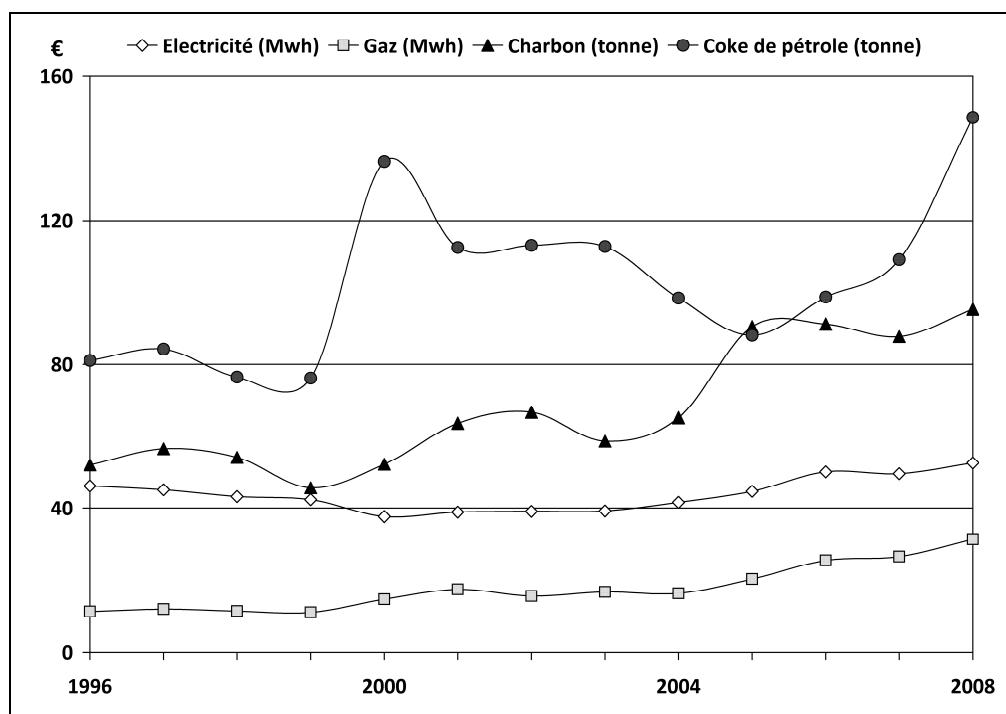


Figure 3.3 : Evolution du prix des énergies premières consommées par l'industrie en France (Source : Insee²⁵)

Malgré la variation du prix, la demande de pétrole semble robuste en France. D'après la Figure 3.3, le prix du pétrole tend en général à augmenter depuis les années 90 et de façon

²⁵ http://www.insee.fr/fr/themes/detail.asp?reg_id=0&ref_id=eacei_2008

plus rapide que les autres énergies. La demande en pétrole n'est cependant pas sensible au prix. C'est-à-dire que le renchérissement du prix du pétrole n'est pas toujours une bonne solution pour réduire la consommation et de fait les émissions (De Boissieu, 2006), car il n'y a pas d'alternative dans beaucoup de ses usages, en particulier au niveau du transport.

Le faible taux de substitution du pétrole face à une augmentation de son prix par absence d'alternative nous a incités, non pas à faire un modèle avec une fonction objectif intégrant une possible fiscalité « verte » (sous la forme d'une taxe carbone par exemple) mais plutôt à bâtir un modèle qui cherche à réduire directement les émissions.

La consommation d'énergie induit des problèmes de pollution. Si l'on s'intéresse maintenant à la problématique de la pollution de l'air, le paragraphe suivant a pour but d'identifier l'état de ce problème environnemental en France.

- **Pollution de l'air**

Dans les secteurs industriels par exemple le transport, les polluants de l'air sont souvent classifiés selon deux catégories en fonction des nuisances qu'ils produisent : gaz polluants directs et Gaz à Effet de Serre.

Les gaz polluants directs conduisent à des nuisances directes sur la santé, ils sont principalement composés par les oxydes d'azote (NO_x), le monoxyde de carbone (CO), les hydrocarbures (HC), le combiné d'hydrocarbures et d'oxydes d'azote (HC + NO_x), les hydrocarbures non méthanique (HCNM) et les particules (PM). L'émission de ces polluants est strictement limitée et contrôlée par les normes d'émissions des véhicules motorisées en Europe (Commission Européenne, 2007b).

Quant aux polluants indirects, c'est essentiellement les GES, appelé aussi GHG (*GreenHouse Gases*) en anglais, qui sont considérés comme des contributeurs au réchauffement planétaire et au changement climatique par leur impact positif sur l'effet de serre. C'est un sujet qui a attiré énormément d'attention à l'échelle mondiale. Selon un rapport du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), ou IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), de 1990 à 2100 les températures mondiales augmenteront de 1,4 à 5,8°C (Houghton et al., 2001). L'hypothèse retenue par les experts du GIEC est que les émissions de GES sont en partie responsables de ce problème. Ces

émissions sont donc devenues un champ d'intérêt et de recherche notamment dans le secteur du transport afin d'en limiter la quantité.

Les GES sont composés par plusieurs gaz artificiels ou non. Parmi eux, six sont inscrits dans le cadre du Protocole de Kyoto, tels que le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), l'oxyde nitreux (N₂O), l'hydrofluorocarbones (HFC), l'hydrocarbures perfluorés (PFC) et l'hexafluorure de soufre (SF₆) (Nations Unies, 1998). Tout particulièrement, **le CO₂**, qui représente près de 77% de l'ensemble des GES (SOeS, 2010), est conventionnellement utilisé comme l'index d'évaluation de l'ensemble des émissions de GES. Cette convention est aussi retenue dans cette thèse.

De plus, une autre remarque sur la corrélation entre la consommation d'énergie et les émissions de CO₂ est intéressante à souligner. Selon les statistiques du CDIAC (*Carbon Dioxide Information Analysis Center*)²⁶ et de l'AIE (Agence Internationale de l'Energie)²⁷, les émissions de CO₂ globales du monde ont connu une croissance de 20,8 Gt en 1990 à 29,3 Gt en 2007, soit plus de 40% d'augmentation en 17 ans. Au contraire, les émissions de CO₂ sur la même période en France ont chuté de 399 Mt en 1990 à 372 Mt en 2007. Mais ce n'est pas le cas pour la partie de CO₂ liée à la combustion d'énergie, voir la Figure 3.4.

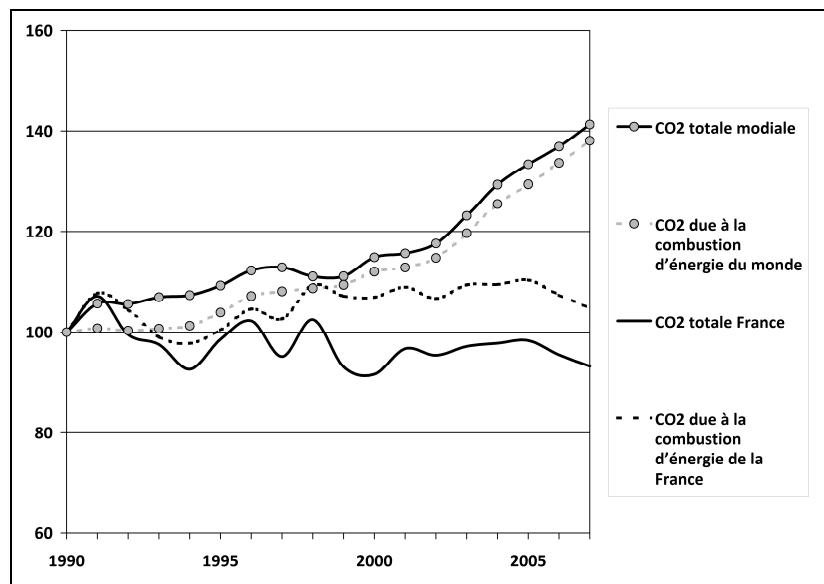


Figure 3.4 : Emissions de CO₂ totales et dues à la combustion d'énergie du monde et de la France (1990 = base 100) (Source : AIE et CDIAC)

²⁶ Présenté au site de l'United Nations Statistics Division, Millennium Development Goals indicators <http://mdgs.un.org/unsd/mdg/SeriesDetail.aspx?srid=749&crid=>

²⁷ <http://www.iea.org/co2highlights/>

En effet, les émissions de CO₂ dues à la combustion d'énergie en France se sont accrues de façon lente depuis 1990 en comparaison avec l'évolution mondiale, soit de 352 Mt en 1990 à 369 Mt en 2007. C'est en partie grâce à la mise en service des centrales nucléaires pour la production d'électricité au début des années 80 (SOeS, 2010), car ces centrales produisent de l'électricité « décarburée ». Or, au niveau national, on peut aussi constater que la partie des émissions de la combustion d'énergie est de plus en plus importante sur l'ensemble des émissions de CO₂, donc mis à part la production d'électricité, les autres secteurs de combustion d'énergie produisent de plus en plus de CO₂, dont de fait le transport au sens large.

Au niveau opérationnel, les facteurs d'émissions de CO₂ français de différentes sources sont présentés dans les rapports «Bilan Carbone» (Jancovici, 2007) de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie). Dans la version V5, la plus récente du rapport, les émissions de CO₂ nationales sont imputées à deux sources : la consommation directe d'énergie ou non.

Dans ce rapport, un chapitre est consacré au transport. Sur ce sujet, les auteurs ont synthétisé les facteurs d'émissions des différents moyens de transport (routier, ferroviaire, aérien, fluvial ou maritime), aussi bien pour les personnes que pour les marchandises. Mais «*l'incertitude sur les facteurs d'émissions pour les transports est largement variable d'un domaine à l'autre*». Ainsi, le calcul des émissions du TRM (Transport Routier de Marchandises) comprend deux composantes : celle liée à la fabrication du véhicule et l'autre concernant la consommation de carburant.

Encadré 3 : Divers facteurs d'émissions en France: Le « Bilan Carbone »

Dans les paragraphes précédents, nous avons montré que les problématiques de développement durable peuvent se décliner selon deux termes, l'exploitation des ressources énergétiques et la pollution due aux GES. Il apparaît donc judicieux de pouvoir disposer de certains outils de pilotage et des mesures politiques afin d'offrir une connaissance commune qui favorise un développement durable. La partie qui suit illustre les principaux enjeux relatifs à la réduction des émissions de CO₂.

3.1.2.2 Une mesure gouvernementale du Développement Durable : le « Facteur 4 »

Le concept de « Facteur 4 » est une forme de slogan marketing qui fixe un objectif de « *division par quatre des émissions de gaz à effet de serre de la France à l'horizon 2050* » (De Boissieu, 2006). Ce concept avait été énoncé en premier par le Président Jacques Chirac

suivi par le Premier Ministre de l'époque Jean-Pierre Raffarin, qui, à l'occasion de l'ouverture de la 20ème session plénière du GIEC en 2003 à Paris, disait :

« Il faut diviser par deux les émissions de GES avant 2050 à l'échelle de la planète » ; pour la France, pays industrialisé, « cela signifie une division par quatre ou par cinq. En vertu du principe de responsabilité commune mais différenciée, nous devons montrer l'exemple en matière de mise en œuvre des politiques domestiques de lutte contre l'effet de serre ». Cet objectif a été ensuite repris dans l'article 2 de la « Loi de programme fixant les orientations de la politique énergétique » du 13 juillet 2005 (De Boissieu, 2006).

L'objectif du « Facteur 4 » est cohérent avec celui du Protocole de Kyoto qui consiste à « stabiliser, conformément aux dispositions pertinentes de la Convention, les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique » (Nations Unies, 1992). L'objectif quantitatif de ce protocole de réduire «le total de leurs émissions de ces gaz d'au moins 5 % par rapport au niveau de 1990 au cours de la période d'engagement allant de 2008 à 2012» (Nations Unies, 1998). 37 pays industrialisés et la Communauté européenne sont concernés. Le « Facteur 4 » vise une réduction de CO₂ plus ambitieuse et à plus long terme que celle du Protocole de Kyoto, mais uniquement en France.

Accroître l'efficacité énergétique dans tous les secteurs d'activités contribuera certainement à tendre vers cet objectif ambitieux car cela induira aussi une amélioration de l'efficience (De Boissieu, 2006). De ce fait, le transport de marchandises est considéré comme un secteur fortement contributeur notamment par son importance dans la consommation d'énergie. C'est pourquoi, nous allons chercher à améliorer l'efficacité du transport de marchandises afin de minimiser les émissions de CO₂.

Cette partie a été consacrée au problème du Développement Durable en se penchant sur les problématiques environnementales: exploitation d'énergie et les émissions de CO₂. Ces deux aspects sont très liés à l'activité du transport de marchandises. C'est pourquoi, nous allons étudier dans le paragraphe suivant le sujet qui traite du développement durable dans le domaine logistique : la logistique durable.

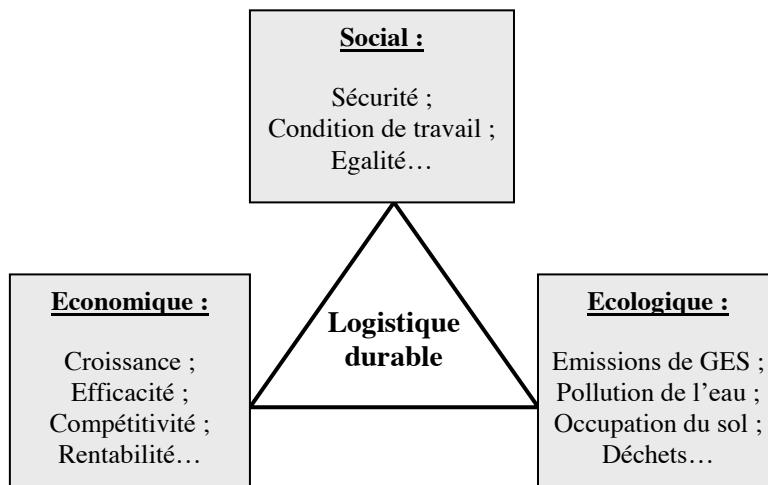
3.2 Interactions du développement durable et de la logistique : la logistique durable

Fort de l'émergence du concept de développement durable, la logistique n'est plus uniquement concernée par l'atteinte d'objectifs économiques mais doit intégrer aussi des objectifs environnementaux. Ainsi, la notion de logistique durable (**SSC : Sustainable Supply Chain**) devient une préoccupation aussi bien pour les entreprises que pour le pouvoir politique.

De ce fait, dans le paragraphe suivant, nous allons d'abord introduire le concept de la logistique durable, et ainsi souligner sa volonté de réduire les émissions de CO₂, afin d'aboutir à ce que l'on nomme une *Green Supply Chain*.

3.2.1 La logistique durable

Comme pour le développement durable, la logistique durable est une discipline qui prend en compte à la fois les contraintes économiques, écologiques et sociales lors de l'élaboration des décisions logistiques, voir la Figure 3.5.



A cette fin, certaines études cherchent à élaborer des modèles d'aide à la décision pour concevoir une chaîne logistique durable. Par exemple, (Chardine-Baumann et Botta-Genoulaz, 2010) propose une approche multicritères qui aide les décideurs à choisir les pratiques logistiques en respectant les questions de développement durable. En principe, l'approche consiste d'abord à identifier les pratiques logistiques potentielles à mettre en œuvre, puis à

évaluer ces pratiques en déterminant leur impact pondéré selon les trois dimensions suivantes : écologique, économique et sociale. Ce type d'approche permet aux décideurs de classifier les pratiques en fonction des critères du développement durable, par exemple pour la dimension environnementale : management (budget, certification, etc.), ressources (énergie, etc.), pollution (air, eau, etc.), danger (les matières dangereuses) et nature (biodiversité, etc.), comme c'est illustré dans cette étude.

Or, parmi les trois piliers de la Figure 3.5, l'écologie a connu un intérêt croissant de la part de la communauté scientifique. Ainsi, à travers une revue des 191 articles de 1994 à 2007 concernant le terme SSC, (Seuring et Müller, 2008) trouvent que près de 90% des études analysées discutent des problèmes environnementaux.

De plus, la réduction des émissions de CO₂ est un objectif important de la logistique durable en cohérence avec la logique du « Facteur 4 ».

Le **GSCM (Green Supply Chain Management)**, comme son nom l'indique, a pour objectif de rendre les activités dans la chaîne logistique plus écologique. Ce n'est pas un sujet récent dans le domaine de la logistique. Par exemple (Bloemhof-Ruwaard et al., 1995) définissent les activités principales du GSCM au fil des flux produits dans la chaîne, des matières premières à la fin de vie du produit, voir la Figure 3.6.

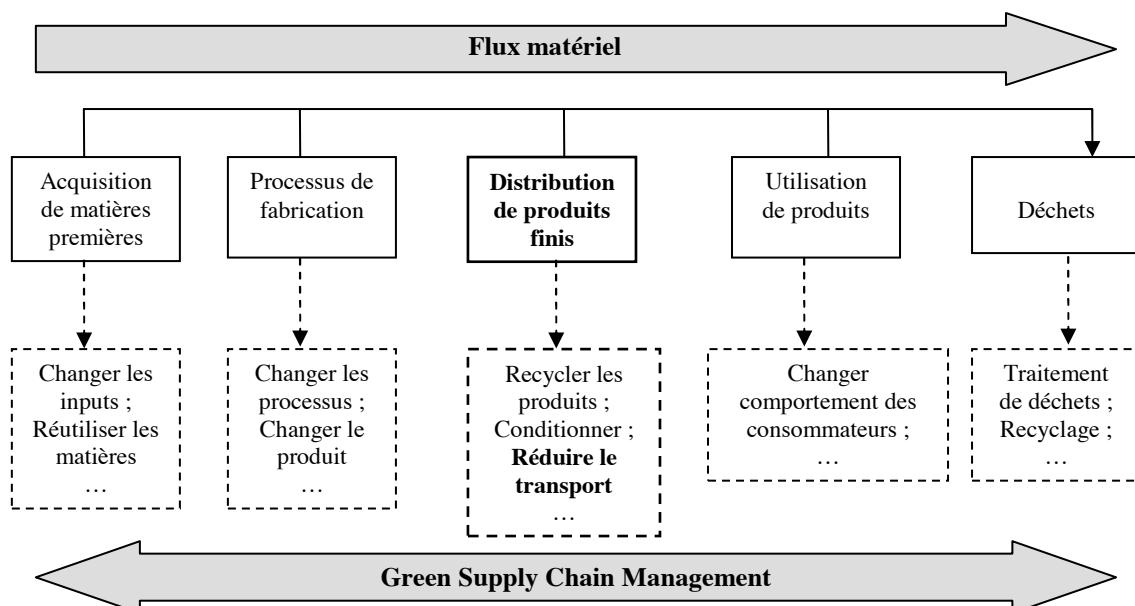


Figure 3.6 : GSCM dans une chaîne logistique traditionnelle (Bloemhof-Ruwaard et al., 1995)

La Figure 3.6 montre que le GSCM est composé de plusieurs activités logistiques. Parmi ces sujets, (Thomas et Griffin, 1996) indiquent que le terme « *green* » s'est accru dans les publications mais que la plupart des travaux sont basés sur la logistique des retours (*Reverse Logistics*) et le système de recyclage (Bostel et al., 2005), le transport ayant reçu relativement moins d'attention sur cette période. Or, le transport doit être étudié précisément pour répondre aux objectifs du GSCM, car, d'une part, la croissance du transport de marchandises est forte et cette tendance se poursuit, voir le paragraphe 3.2.2 suivant, et d'autre part, il s'agit d'une activité qui contribue massivement aux émissions de CO₂ par rapport aux autres activités de la logistique, voir le paragraphe 3.2.3. Comme le précise la Figure 3.6, Bloemhof-Ruwaard et al. stipulent qu'une réduction du transport est nécessaire afin d'accroître la dimension « *green* » de la chaîne logistique.

Les discussions ci-avant montrent que le transport, notamment routier, est donc un sujet important de recherche dans le domaine de la logistique durable. Afin de souligner ce problème, les analyses suivantes seront déclinées sur les problématiques du transport de marchandises, notamment sur le problème des émissions de CO₂. De ce fait, on peut commencer la discussion par une question : le développement du transport routier de marchandises est-il durable ?

3.2.2 Transport routier de marchandises : son développement est-il durable ?

3.2.2.1 Domination du transport routier pour les marchandises

Dans le chapitre précédent, il a été souligné que le transport de marchandises est en pleine croissance. De plus, vu les caractéristiques des flux (diminution du volume par expédition et grande diversification), la croissance des transports se fait quasiment exclusivement sur le transport routier. Cette assertion est parfaitement illustrée par la Figure 3.7 ci-après qui montre que le mode routier reste toujours le premier pour le TM (Transport de Marchandises) depuis des décennies en France.

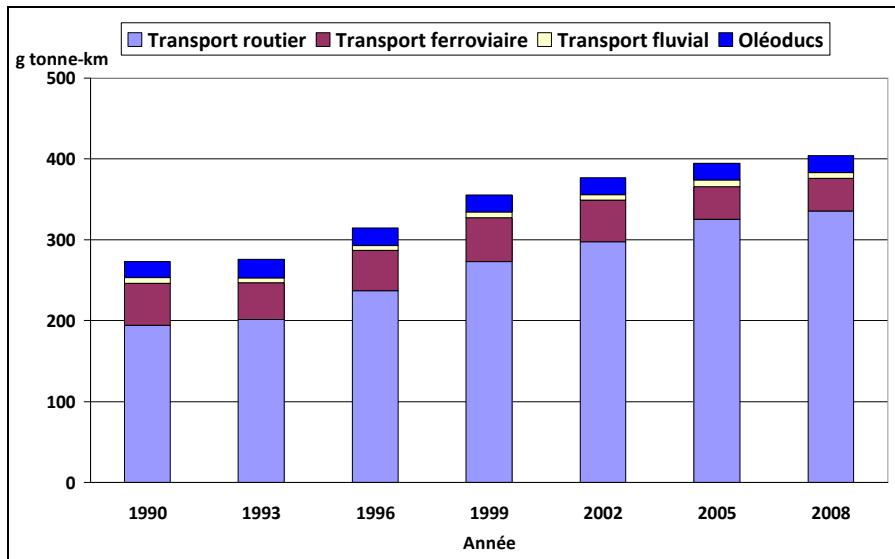


Figure 3.7 : Transports intérieurs terrestres de marchandises par mode (1990-2008 en France)
(Source SOeS, Compte des Transports)

Selon la Figure 3.7, on voit que le fret en tonnage-km augmente de façon régulière, mais que le report modal est faible. Le TRM (Transport Routier de Marchandises) s'accroît au même rythme que le fret mais les autres modes, ferroviaire, fluvial et oléoducs se maintiennent quasiment au même niveau, voire connaissent un recul par exemple le transport ferroviaire. Cela signifie que le transport de fret est de plus en plus dominé par le routier, ainsi il faut noter que 71% du fret était transporté par la route en 1990 et qu'en 2008 c'est 82% du fret qui mobilise ce mode de transport (en tonne-km). La situation européenne est quasiment identique, soit 77% en TR de l'ensemble du fret intérieur terrestre de l'EU-25 (Source : Eurostat, rubrique Transport²⁸). Même si cette situation peut varier selon les contextes nationaux en fonction de la variation du prix du transport et de la qualité de service des modes de transport (Santos et al., 2010).

Si l'on s'intéresse maintenant aux perspectives relatives au développement du fret en France, il est important de mentionner le rapport réalisé par le MEEDDAT dans le cadre du PREDIT (MEEDDAT, 2008). En effet, ce travail étudie les évaluations des TM, en faisant des hypothèses à l'horizon 2030. Ainsi, quatre scénarios sont analysés comme autant de trajectoires possibles de développement du fret. Le premier scénario, « **La firme mondiale** » porte sur une hypothèse que le fret et la logistique se développent sans véritable régulation publique, c'est-à-dire la libéralisation économique entre les entreprises. Cela contribuerait à une forte croissance de la demande en transport pour satisfaire l'expansion du marché.

²⁸ http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=tran_hv_frmod&lang=fr

Deuxièmement, le scénario « **Régulation par l'économie** » suppose que l'Etat lance des réglementations pour rééquilibrer les modes de transport à travers diverses tarifications touchant par exemple la route et le ferroviaire. Le troisième scénario « **Petites Europes** » se base sur une forte contrainte liée au prix du pétrole. Autrement dit, si le prix du carburant, ou en réalité le coût de transport augmente considérablement, la corrélation entre croissance économique et demande de transport notamment routier est moins évidente. Concernant le dernier scénario « **Peak Oil** », comme le sous-entend son nom, il étudie le cas où il y a une rupture énergétique. On peut donc imaginer la possibilité de mise en pratique d'un système de rationnement et de quota sur la consommation d'énergie face à ce genre de crise. Dans ce cas, le transport affronterait une très grave difficulté. Enfin, le scénario tendanciel a été dans le même temps étudié dans le rapport. Il consiste à faire prolonger de manière linéaire la situation de la période récente en prenant en compte « *un certain nombre de ruptures d'ores et déjà annoncées ou probables, que ce soit dans le domaine économique, démographique, technologique, social, politique ou réglementaire* ». Ce scénario a été exposé par les chiffres issus d'une étude comparable du SESP (SOeS, 2007)²⁹ dans laquelle la projection a été faite jusqu'à l'année 2025. S'appuyant sur les cinq possibilités du futur, le Tableau 3.1 synthétise l'état du trafic de fret estimé dans 15 ou 20 ans.

G tonne-km	2002	2030 (S1)	2030 (S2)	2030 (S3)	2030 (S4)	2025 (ST)
Transport Routier	257	412	340	296	272	363
Transport ferroviaire	50	50	80	76	87	59
Transport fluvial	6.9	7	20	15	20	9
Total	314	469	440	387	379	431

Tableau 3.1 : Transport de marchandises à l'horizon 2030 (d'après (SOeS, 2007), sans cabotage maritime)

Selon tous les scénarios, il est évident que le fret (mesuré en t-km) connaît une croissance jusqu'en 2030, de l'ordre de 21% à 50% (hors le cabotage maritime, ou *Short See Shipping*) par rapport à la référence de l'année 2002. De plus, le report modal reste cependant faible. Quel que soit les contraintes des scénarios, le TR serait toujours le premier mode de transport du fret, en se maintenant à au moins 72% du S4 face à la crise énergétique et au plus à 88% au S1 n'ayant aucune régulation publique. D'ailleurs, le transport ferroviaire, qui est considéré comme un moyen de transport à stimuler, resterait presque au même niveau selon

²⁹ Les chiffres du scénario tendanciel présentés dans le rapport «Prospective fret 2030» du MEEDDAT sont issus du rapport du SESP en 2004 et les chiffres présentés dans le Tableau 3.1 ici sont obtenus après la mise à jour du rapport en 2007.

les scénarios, soit entre 11%~23% estimé par rapport à la référence actuelle à 16%. Et les transports fluviaux qui traitent entre 1%~5% des flux d'après les projections seraient relativement beaucoup moins importants. Les projections des scénarios reposent sur l'accroissement du fret constaté par le SOeS (Source : SOeS, 2008³⁰). Selon les données concernant 2008, le fret en tonne-km (transportés par la route, le chemin fer et la voie fluviale) a cru de presque 8% par rapport au niveau en 2002, le TR a connu une croissance d'environ 13%, ainsi qu'une croissance de 8% pour le transport fluvial. Au contraire des estimations des scénarios, le transport ferroviaire de marchandises a reculé de 20% en 2008 par rapport à l'année 2002.

Cette « domination » du transport routier peut s'expliquer par sa flexibilité et son accessibilité. La **flexibilité** du TR se comprend par sa capacité à traiter de petits volumes et à concéder peu de rupture de charge tout en garantissant une facilité d'affectation des flux (Filser et al., 2001) et (Chopra et Meindl, 2004).

La bonne **accessibilité** du TR est également un grand avantage par rapport aux autres moyens de transport en raison des infrastructures développées, par exemple le « porte-à-porte » n'est quasiment plus possible que par la route. Cette situation s'explique aussi en partie par les choix d'investissements nationaux sur la route qui ont été largement privilégiés par rapport aux autres canaux de transport. Ainsi, en 2006 sur un budget national de 16 milliards d'euros dédiés aux investissements en infrastructures de transport, 66% a été dépensé pour la route et 12% pour les investissements ferroviaires et 12 % pour les transports collectifs urbains (MEEDDAT, 2008). Autrement dit, le réseau de distribution de fret est largement en faveur du TR. C'est aussi la raison pour laquelle, bien que le transport intermodal soit de plus en plus mis en avant, la route est encore utilisée massivement.

Néanmoins, l'utilisation du transport routier rencontre certains inconvénients tels que la saturation des infrastructures de transport, la nuisance sonore, la sécurité, la consommation énergétique et la pollution de l'air. La saturation des infrastructures de transport s'opère à deux niveaux, d'une part sur la congestion du trafic urbain, ce qui signifie que la livraison de fret par camion est une perturbation importante pour le transport routier de personne. Ce genre de problème est souvent mis en évidence dans les régions qui ont une forte densité de population comme la région Ile-de-France. D'autre part, le transport routier inter-ville a tendance à saturer le réseau routier sur « les corridors » nationaux ou européens (PIPAME et

³⁰ http://www.statistiques.equipement.gouv.fr/rubrique.php3?id_rubrique=489 , Annexes M.

CNAM, 2009a) et (MEEDDAT, 2008). De même, la nuisance sonore et la sécurité de TR sont incontestablement des problèmes gênants dans la vie quotidienne.

Mais par rapport à la question de la logistique durable notamment si l'on souhaite intégrer la préoccupation relative à l'effet de serre, il est nécessaire d'étudier **la pollution de l'air notamment par les gaz à effet de serre, tout particulièrement le CO₂**. Comme l'on a dit auparavant, ce sujet est très lié à **la consommation d'énergie**. Ainsi, dans le paragraphe suivant nous illustrerons les problèmes du transport routier concernant ces deux sujets, en faisant la comparaison avec les autres modes de transport.

3.2.2.2 Comparaison des modes de transport de marchandises

D'après les analyses menées sur le transport de marchandises ci-dessus, on se rende compte que la mode routier (TRM) est actuellement en position dominante pour le transport de fret. C'est dans ce contexte que l'on peut se demander si le développement du transport routier est durable ? Pour y répondre, il sera utile d'analyser l'efficacité du TRM du point de vue de la logistique durable, c'est-à-dire son efficacité écologique et sa consommation énergétique, par rapport aux autres modes de transport.

En termes d'émissions, le transport routier hexagone est aussi polluant que le transport aérien et beaucoup plus polluant que le train et le bateau en unité g CO₂ équivalent/tonne-km, comme le montre la Figure 3.8. Les indicateurs de cette figure correspondent au facteur d'émissions associé à la consommation d'énergie pour transporter 1 tonne-km de fret (l'énergie pour pousser le poids total divisé par le poids des charges utiles) et il ne concerne que les trajets en charge. Or, il faut souligner que les facteurs d'émissions dans cette figure ne sont pas élaborés selon les mêmes conventions, ainsi, la comparaison se fait au niveau des grandeurs. Selon cet indicateur, on peut constater que pour transporter 1 tonne-km de fret, le transport routier est le plus polluant par rapport aux autres moyens terrestres, notamment pour les petits ou moyens camions. Cela est conforme à la situation européenne (EEA, 2005) et (Eurostat, 2007). Si l'on regarde la répartition d'émissions par différents modes de transport de fret, près de 94% de l'ensemble de CO₂ sont générés par la route (ADEME, 2007).

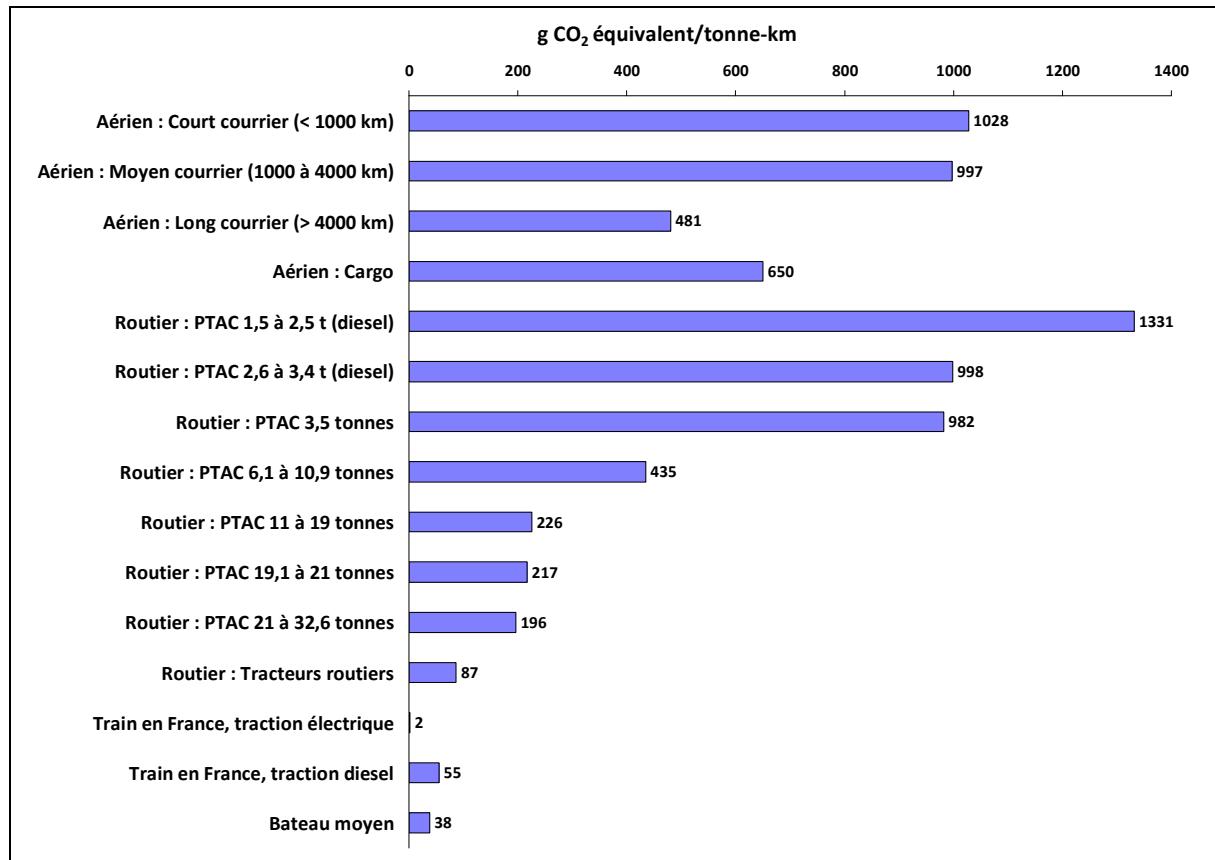


Figure 3.8 : Efficacité environnementale par mode de transport de marchandises en France (trajets non vides avec charge moyenne d'après «Module GES transports - calcul des émissions», EPE/ADEME, octobre 2005³¹)

Le problème des émissions de gaz (notamment de CO₂) du transport peut se traduire par **la consommation d'énergie**. Pour le transport routier, notamment pour les marchandises, le rapport (MEEDDM, 2010a) indique que la consommation d'énergie est importante pour ce mode de transport : sur l'ensemble du transport (voyageurs et marchandises), plus de 80% des énergies (fossile et électrique) sont consommées par le mode routier, dont 41% dédiées au TRM. De plus, l'énergie consommée par le TRM est en croissance stable depuis 1980, voir la Figure 3.9 (Source : SOeS, Compte Transports³²). Cette figure illustre que le TRM a vu sa consommation d'énergie doubler de 1980 à 2008, juste après le transport aérien (pour marchandises et voyageurs). Par rapport à la projection de fret à l'horizon 2030 qui démontre que la dominance du TRM se poursuivrait, on peut donc présumer que la consommation d'énergie doit être aussi une préoccupation importante pour la logistique.

³¹ http://www.epe-asso.org/index.php?part=publi&id_rap=79

³² http://www.statistiques.equipement.gouv.fr/IMG/xls/Chapitre_1-Synthese_tous_modes_cle7ea1d.xls

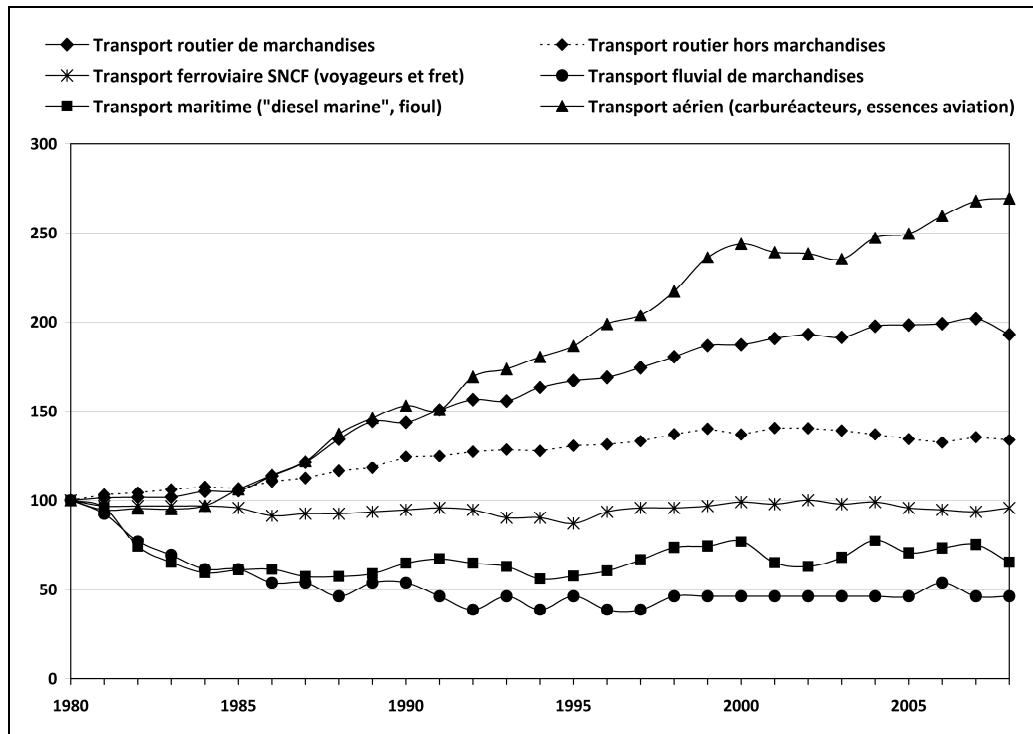


Figure 3.9 : Consommation d'énergie de traction selon le mode de transport (1980 = base 100)

Les analyses ci-dessus, respectivement sur les émissions de CO₂ et la consommation énergétique du TRM, nous permettent de conclure que l'évaluation de ce type de transport est de plus en plus préoccupante, particulièrement si sa domination du mode routier se poursuit. De plus, dans les thématiques du développement durable, le problème des émissions de CO₂ doit être surtout souligné dans le domaine du TRM. A cette fin, nous allons ensuite identifier la partie des émissions de CO₂ rejetées par le transport de marchandises, spécialement le mode routier pour montrer son importance.

3.2.3 Les émissions de CO₂ liées au transport terrestre de marchandises

D'abord, le transport se décline par la nature de ce qui est transporté : passagers ou marchandises ; par le mode auquel on recourt : routier, ferroviaire, fluvial, oléoducs et aérien. De ce fait, dans la littérature il existe de nombreuses références sur l'estimation des émissions du secteur du transport en fonction du périmètre ou du contexte pris en compte.

Ainsi, au niveau européen, (Eurostat, 2007) donne un panorama général sur les transports et montre que le transport dans son ensemble (passagers et marchandises) représente 19% de l'ensemble du CO₂ rejeté par les 25 membres de l'EU en 2004, dont 93,4% est produit par les transports routiers. Une autre constatation importante de ce rapport est que le transport est le seul secteur qui a connu une croissance de 24% en CO₂ rejeté par rapport au niveau en 1990,

alors que tous les autres secteurs (industriels, résidence, etc.) génèrent en moyenne -5% de CO₂. De plus, si l'on compare les émissions des différents polluants liés au transport, il est estimé que les émissions de CO₂ devrait rester stable, au contraire d'une chute notable pour les émissions des autres polluants (ex : CO, NO_x, etc.) jusqu'à 2020 (Commission Européenne, 1999).

Quant aux émissions des transports de marchandises, la plupart des travaux s'inscrivent en ciblant transport routier de Marchandises (TRM). Ainsi, (McKinnon, 2006) présente la situation britannique en 2004 : les émissions de CO₂ annuelles dues au transport intérieur de fret de la Grande-Bretagne s'établissent à 33,7 millions tonnes, soit environ 21% du secteur du transport (passagers et marchandises) et à 6% de l'ensemble des émissions nationales, dont 92% est produit par le transport routier. Ces données sont cohérentes avec les rapports européens présentés ci-avant. D'ailleurs, (Léonardi et Baumgartner, 2004) qui se concentrent sur le transport routier, indiquent que le TRM représente 29% du secteur de transport (passagers et marchandises) et 6% de l'ensemble des émissions de CO₂ en Allemagne en 2001.

En France, la situation des émissions des transports est étudiée dans plusieurs travaux du gouvernement, principalement du ministère MEEDDM et de l'agence ADEME. Par exemple, selon les données les plus récentes et disponibles qui sont présentées dans le rapport du MEEDDM (CITEPA, 2010), il est estimé que les émissions de CO₂ de tous types de transport s'établissent à 127 Mt, soit 33% de la totalité du CO₂ rejeté en 2008 (valeur hors l'Utilisation des Terres, leur Changement et la Forêt). Le transport routier génère à lui seul près de 94% de CO₂ liés au secteur de transport, dont plus de 45% est imputable aux marchandises. Autrement dit, le TRM produit environ 14% du CO₂ national. Comme le montre les rapports (MEEDDAT, 2008) et (SOeS, 2009) et la Figure 3.10, le secteur du transport est depuis des années le premier contributeur aux émissions de CO₂ liées à la consommation énergétique par rapport aux autres secteurs en France. De plus, il est le seul secteur qui produit annuellement plus de CO₂ d'année en année depuis 1990. Cette constatation est identique au niveau européen (Eurostat, 2007).

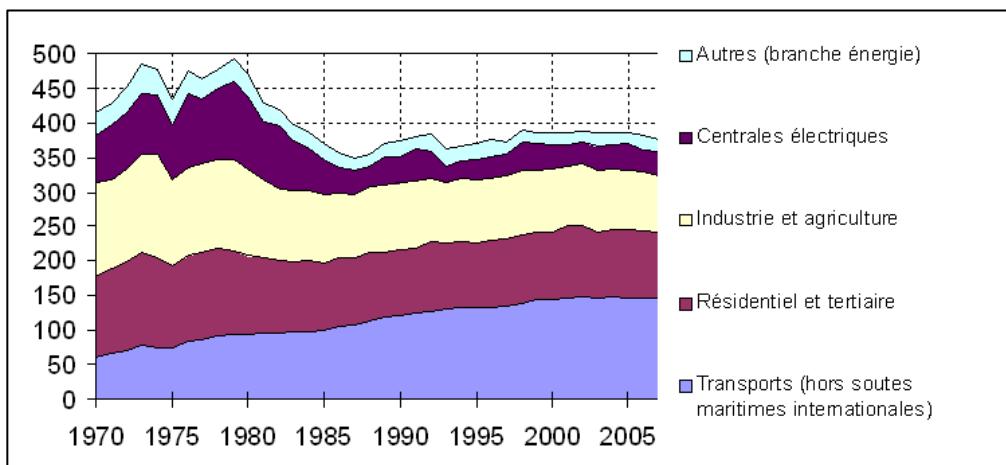


Figure 3.10 : Emissions de CO₂ dues à l'énergie avec correction climatique en France Métropolitaine (en millions de tonnes de CO₂) (Source : SOeS 2010³³)

Bien que les analyses (nationales ou européennes) discutées ci-avant ne soient pas complètement identiques en raison des différents critères d'évaluation, elles permettent de souligner que le transport de marchandises, notamment par la route, contribue pour de plus en plus significativement aux émissions de CO₂.

C'est pourquoi, la communauté scientifique et les praticiens en logistique se concentrent sur la recherche de solutions permettant de réduire le CO₂ rejeté par le transport de fret. Le paragraphe suivant a pour objectif de d'identifier les différentes pistes qui peuvent conduire à diminuer ces émissions.

3.2.4 Les possibles solutions pour réduire les émissions de CO₂ du transport routier

Afin de réduire les émissions de CO₂ du transport de fret, un rapport européen (Commission Européenne, 1998) a identifié les différents axes de recherche et de travail qui peuvent être mobilisés. La Figure 3.11 présente les différentes démarches possibles.

³³ http://www.statistiques.equipement.gouv.fr/rubrique.php3?id_rubrique=456

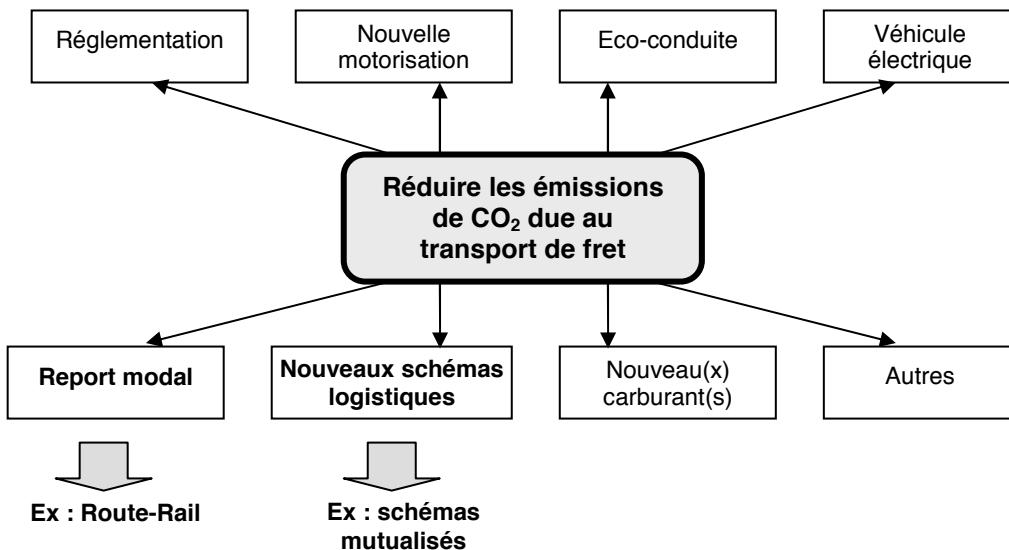


Figure 3.11 : Chemins vers l'objectif de réduire les émissions de CO₂ liées au transport de fret

Réglementation : il s'agit des mesures politiques qui visent à encourager les transports «décarburés», par exemple les normes européennes d'émissions³⁴ ou la taxe carbone. A l'évidence, ces réglementations influencent les émissions en imposant de nouvelles contraintes écologiques aux activités de transport ;

Nouvelle motorisation : cet axe table sur les progrès techniques liés à la propulsion, il est prévisible que la prochaine génération de moteur sera moins polluante. C'est déjà partiellement conventionné par la mise en œuvre des normes d'émissions. Par exemple, McKinnon indique dans le rapport (McKinnon, 1999) que les progrès techniques depuis 1980 sur la conception des moteurs permettent d'augmenter de 20% le kilométrage réalisé à iso carburant ;

Véhicule électrique ou hybride : il s'agit de la mise en service de la technologie de batterie sur les véhicules. Il est assez clair que les véhicules électriques n'émettent pas de CO₂, mais cette solution est encore limitée par certaines contraintes, telles que la nécessité d'une production d'électricité plus grande et décarbonnée, l'implantation des stations de charge, la durée de la vie de batterie, la sécurité, etc. ;

Eco-conduite : quoique ce sujet n'ait pas été discuté dans le rapport européen mentionné, il représente aussi une opportunité pour réduire le CO₂ rejeté, notamment pour les transports

³⁴ Les normes d'émissions comme EuroI à EuroV ne contrôlent que les émissions de gaz toxiques sans le CO₂, mais offrant également une possibilité pour réduire le CO₂ évacué par le véhicule, voir le chapitre concernant la modélisation des émissions de CO₂;

particuliers³⁵ en modifiant les habitudes de conduite. Par exemple le rapport (McKinnon, 1999) a estimé que le principe de l'éco-conduite parmi les chauffeurs de camion fait augmenter potentiellement 15-20% de l'efficacité énergétique du transport de fret ;

Nouveaux combustibles : à ce propos, on pourra d'une part essayer de rendre les carburants fossiles moins polluants en changeant leur composition moléculaire, d'autre part profiter des nouveaux carburants non fossiles, par exemple l'hydrogène ;

Report modal : Il consiste à reporter les flux de la route vers d'autres modes moins polluants, par exemple le transport ferroviaire. C'est une démarche importante pour réduire les émissions liées au transport de fret. Toutefois, la mise en œuvre de cette solution est souvent limitée par des contraintes économiques et des contraintes logistiques. Dans le sens économique, le report modal, par exemple par le transport combiné train/camion, apportera éventuellement un surcoût au niveau du transport avec la structure de prix actuelle. Par exemple, afin de réduire les émissions de CO₂, Monoprix a réalisé un projet avec ce type de transport pour approvisionner leurs enseignes situées à Paris (Noyer, 2010b). Cette démarche induit un surcoût de 15% à 20% au niveau du transport, «*qui est dû pour près de moitié à la rupture de charge (la manutention entre le train et les camions à Bercy), et, pour le reste, à l'absence de variabilité des coûts d'un train*» (Noyer, 2010b). Les contraintes logistiques se traduisent par exemple par la taille d'expédition importante (Woodburn, 2003), ou par la disponibilité des infrastructures et des services de transports alternatifs en faveur des transporteurs (Campisi et Gastaldi, 1996), (Woodburn, 2003) et (Haenel et Gerbaud, 2003). Spécialement, en France, le défi du transport ferroviaire est typiquement sur l'allocation de sillons performante : «*Parce qu'il partage le réseau ferré avec le transport de passagers, le fret ferroviaire n'a pas assez de voies pour contourner les villes*», explique Bruno Gazeau, directeur général de l'Union des transports publics et ferroviaires (Marmet, 2010). De plus, l'accessibilité et la flexibilité sont aussi des limites logistiques importantes pour d'autres modes de transport que la route.

Nouveaux schémas logistiques : en ce qui concerne le transport de fret, le rapport de la Commission Européenne stipule que l'amélioration de l'efficacité des opérations de transport par de nouveaux schémas logistiques a un impact positif pour réduire les émissions de CO₂. Par exemple l'augmentation du taux de chargement et la réduction du nombre de trajets à vide pourraient permettre de diminuer de 10% à 40% les km parcourus et donc les émissions de

³⁵ Quant au principe de l'éco-conduite, voir <http://www.ecoconduite.fr>

CO₂ (Commission Européenne, 1998). De plus, (McKinnon et Woodburn, 1994) révèlent dans leur étude sur le transport que la consolidation de fret du commerce de détail peut probablement réduire les émissions du transport de fret. Cette possibilité est aussi discutée dans (Kohn et Brodin, 2008) qui porte sur la centralisation des systèmes de distribution.

Dans ce travail de recherche, nous nous sommes inscrits dans l'axe de travail « nouveaux schémas logistiques » et plus précisément dans la mutualisation des schémas logistiques.

3.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons positionné le transport de marchandises dans le cadre du développement durable. Les problèmes environnementaux liés au transport de marchandises démontrent que cette activité est de plus en plus préoccupante, notamment si l'objectif de la minimisation d'émissions de GES comme le « Facteur 4 » est maintenu.

De ce fait, nous avons ensuite discuté les solutions pour réduire les émissions de CO₂ rejetés par le TRM. Du point de vue logistique, nous nous concentrerons sur l'axe « nouveaux schémas logistiques ». Nous envisageons que la mutualisation, comme on l'a définie dans le chapitre précédent, puisse éventuellement être une solution pertinente.

En outre, la recherche bibliographique liée à ce chapitre démontre aussi l'absence de modèles d'optimisation pour définir les nouveaux schémas logistiques verts. Ce constat est identique à celui fait par (Benjaafar et al., 2010) : ces communautés de Recherche Opérationnelle sont encore quasiment absentes de la logistique durable. De ce fait, dans le prochain chapitre nous allons élaborer un nouveau modèle d'optimisation au niveau de la conception du réseau, qui permet de définir les schémas logistiques en minimisant les émissions de CO₂ du transport.

Chapitre 4. Modélisation des émissions de CO₂ du transport pour la création de modèles d'optimisation logistique

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

4.1.2 Modélisation du facteur des émissions de CO₂ de transport routier

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

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

⁴⁰ <http://lat.eng.auth.gr/copert/>

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

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

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

Encadré 4 : Présentation du projet européen « COPERT »

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Avec :

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

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

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

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

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

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

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

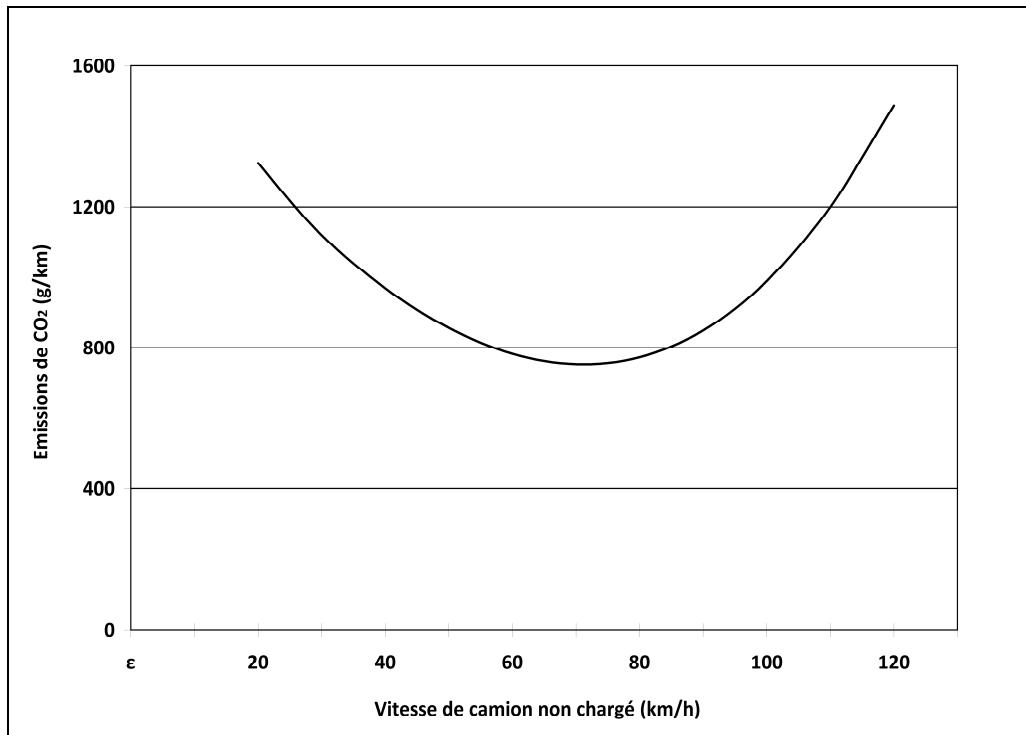


Figure 4.1 : Les émissions de CO₂ en fonction de la vitesse d'un camion roulant à vide

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

où x est le nombre palettes transportées, d est la distance en km et c est la capacité de chargement du camion qui varie en fonction du type de produit à transporter ($c=33$ ou 23). Selon la H5, les valeurs des ε_{plein} et ε_{vide} sont identiques pour tout type de produits, donc ce sont des constantes dans la formule. La partie du nombre entier supérieur $\left\lceil \frac{x}{c} \right\rceil$ signifie le

nombre de camions nécessaires pour effectuer la livraison et l'autre partie est pour calculer les émissions variables en fonction des charges des camions. **Il est évident que les trajets de retour à vide ne sont pas considérés dans la fonction. Par contre la contrainte sur la capacité de camion est strictement respectée dans le modèle.** Finalement, nous avons la fonction d'émissions de camion :

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

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

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

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

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

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

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

⁴¹ NO_x, CO, THC, NMHC, THC+NO_x, PM

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

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

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

4.1.3 Modélisation du facteur des émissions de CO₂ du transport ferroviaire

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

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

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

E_i : l'émission du polluant *i* en kg ;

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

⁴³http://europa.eu/legislation_summaries/internal_market/single_market_for_goods/motor_vehicles/interactions_industry_policies/l28200_en.htm

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

Tkm : les marchandises transportées en tonne-km ;

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

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

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

H1 : le train considéré est dans la catégorie de train pour marchandises non pondéreuses (tare totale à 600 tonnes). D'après les expériences sur le TFM, il fait l'hypothèse qu'un train complet est composé d'une locomotive de 70 tonnes et de 26 wagons de type R2O avec tare près de 24 tonnes. La tare totale d'un train complet est alors supérieure à 600 tonnes. Se basant sur la catégorie de train, la formule B9 dans (Hickman et al., 1999) est adaptable :

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

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

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

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

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

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

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

H4 : un train minimal est composé de 13 wagons de type de R20 (taille minimale actuelle des affrètements en demi-train complet), autrement dit la tare pour le train est de 70 (locomotive)+13x24 (R20)=382 tonnes. Donc, les émissions de CO₂ pour un train à vide de 13 wagons par km sont de : E_{vide}=0,001303x382=0,498 kg /km

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

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

$$E_{pleine}=0,001303x(70+51,3x13)=0,96 \text{ kg/km (produits légers)}$$

$$E_{pleine}=0,001303x(70+63,1x13)=1,16 \text{ kg/km (produits lourds)}$$

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

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

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

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

⁴⁷

http://fret.sncf.com/fret/nos_services_et_offres_commerciales/nos_services_logistiques/notre_catalogue_de_wagons/280-rls_r20_wagons_plats_courants.html

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

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

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

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

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

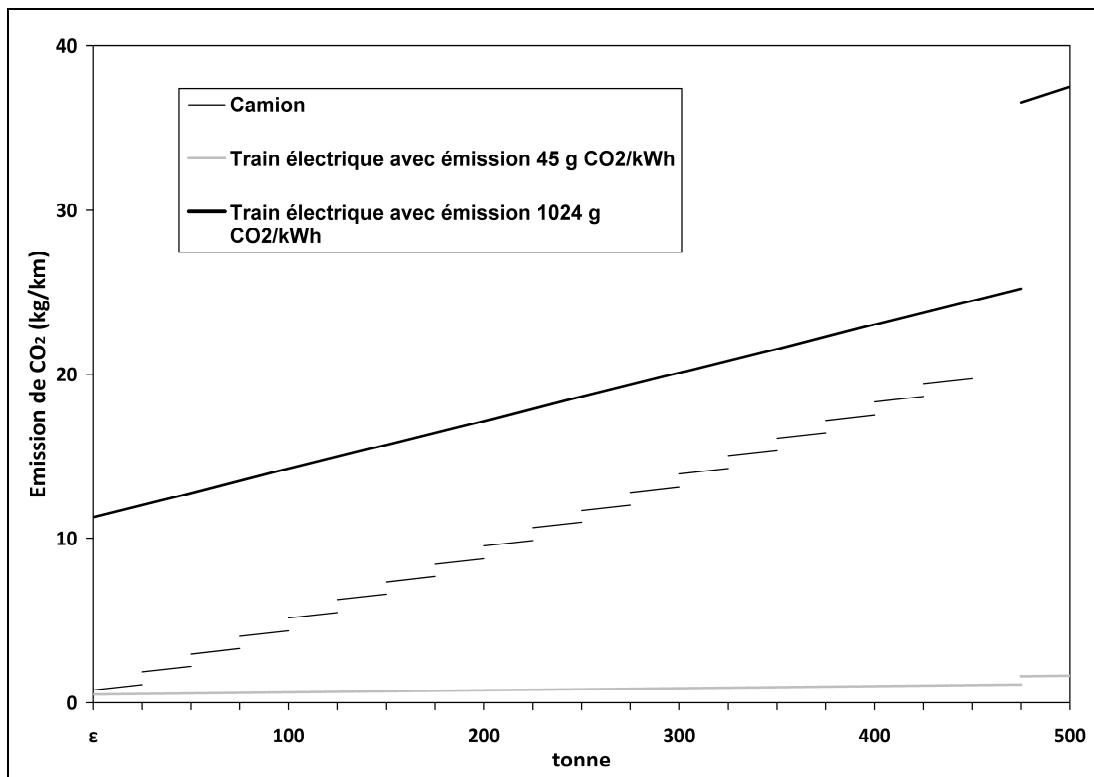


Figure 4.2 : Comparaison des émissions des moyens de transport

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

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

4.2 Modélisation de coûts logistiques

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

4.2.1 Coût de transport

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

4.2.1.1 Coût de transport routier

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

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

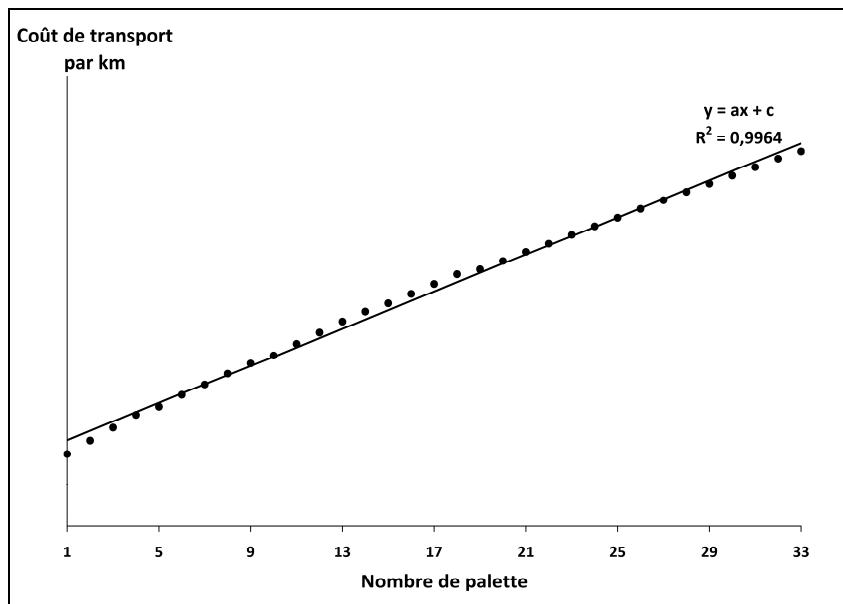


Figure 4.3 : Analyse du coût de transport en fonction du nombre de palettes transportées

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

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

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

4.2.1.2 Coût de transport ferroviaire en France

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

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

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

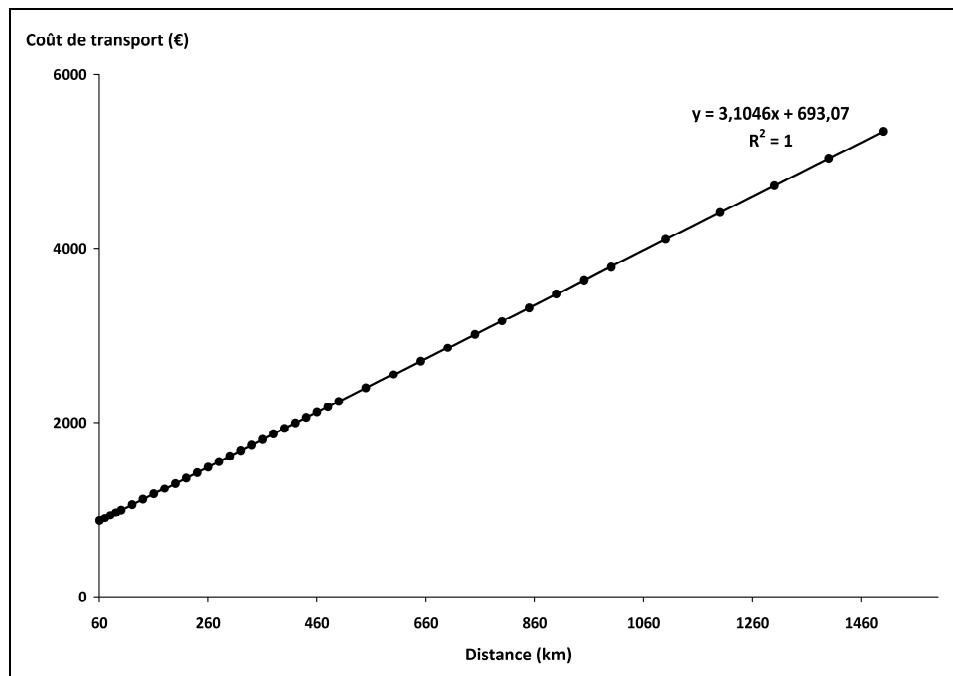


Figure 4.4 : Coût de transport d'un wagon par km (Barème général de transport avec les wagons à plus de 2 essieux ou à bogies de la Fret SNCF 2009⁴⁹)

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

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

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

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

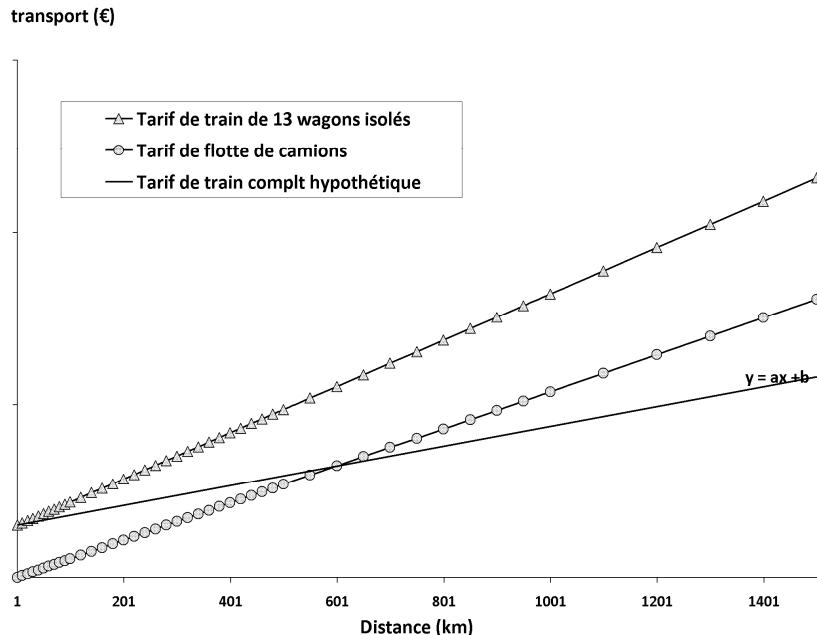


Figure 4.5 : Détermination de la courbe tarifaire de train complet hypothétique

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

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

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

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

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

4.2.2 Coût des stocks

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

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

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

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

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

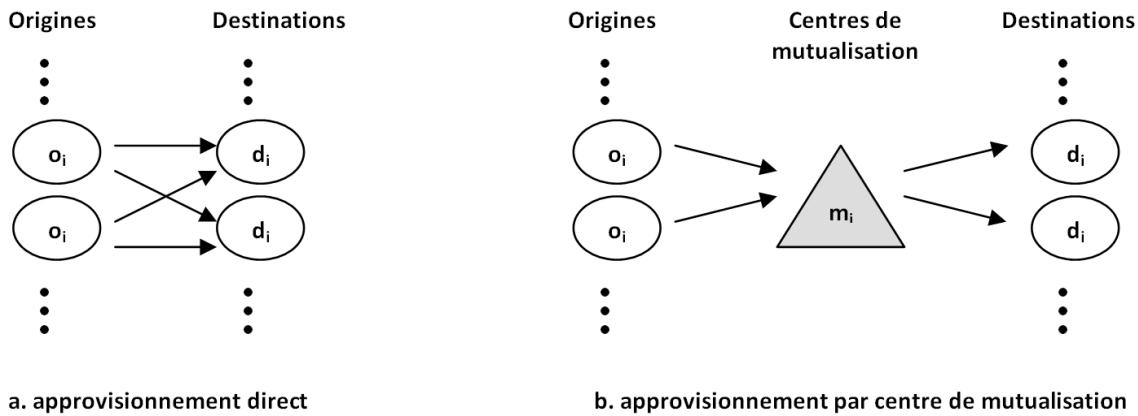


Figure 4.6 : Exemple des réseaux de distribution directe ou avec centre de mutualisation

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

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

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

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

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

Avec :

K : l'ensemble de produits k ;

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

P^k : la valeur de produit k ;

R : le taux de possession par unité de temps;

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

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

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

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

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

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

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

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

Avec :

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

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

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

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

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

4.2.3 Autres composants de coûts logistiques

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

Le coût de passage des flux par une plateforme correspond aux coûts divers liés à la manutention des flux internes à la plateforme. Il est mesuré en €/palette. Le coût total de passage se différencie selon l'organisation du site logistique, avec une composante de stockage ou de transit seulement. Pour le site lié aux flux en stockage, il concerne à la fois le coût de palette en entrée (décharge de camion, mise en place, etc.) et le coût de palette en sortie (préparation de livraisons, tri, emballage, charge de camion, etc.).

Le coût d'arrêt de véhicule : il correspond au coût d'immobilisation du camion lors d'un arrêt pour chargement ou déchargement Il est mesuré en €/arrêt pour un temps d'arrêt constant. Ce type de coût ne concerne pas les transports directs mais les transports en multi-stops (Multi-pick ou Multi-drop). On prend pour hypothèse que le nombre d'arrêts pour un trajet égale le nombre de sites de colletage ou de livraison, donc nombre d'arrêt=n-1, où n est le nombre de sites concernés lors d'un trajet et 1 indique le point de départ pour multi-drop ou la destination finale pour multi-pick.

Dans les cas étudiés, les tarifs concernant ces deux termes de coût sont communiqués par les industriels.

Dans les paragraphes ci-dessus, nous avons illustré comment les composants de coûts logistiques sont élaborés : le coût de transport, de stockage, de passage de flux et d'arrêt de véhicule. Evidemment, ces coûts sont tous liés au transport qui est le sujet de discussion de cette thèse.

4.3 Crédit des modèles d'optimisation minimisant les émissions de CO₂ du transport de marchandises

Cette section est consacrée à définir un nouveau modèle d'optimisation qui minimise les émissions de CO₂ de transport par la conception de réseaux logistique mutualisés. A cette fin, nous allons d'abord analyser les modèles existants en matière de problème de transport de marchandises. Avant tout, il est nécessaire de préciser que cette partie ne vise pas à créer de nouveaux algorithmes de résolution de problèmes de transport mais de proposer et de justifier des choix de modélisation, s'appuyant sur la littérature existante, pour proposer une modélisation et des méthodes de résolution efficace pour le problème de la minimisation des émissions d'un réseau de transport mutualisé.

En effet, l'optimisation des transports de marchandises n'est pas un nouveau sujet dans le domaine du SCM et ce problème est bien connu en recherche opérationnelle. Cependant, jusqu'à ce jour il n'existe pas de modèle d'aide à la décision pour la minimisation des émissions de CO₂ au niveau de la conception de réseaux. C'est pourquoi, nous nous proposons de construire ici un tel modèle.

Avant de construire le nouveau modèle, quel est l'état de l'art sur le problème de réseaux de distribution pour le transport de fret.

4.3.1 Modèles existants pour le transport de marchandises

Au niveau du transport de marchandises, (Crainic et Semet, 2005) classent les organisations de transport en deux types : consolidation et direct. Le dernier type consiste en un schéma «porte-à-porte» du site d'un chargeur spécifique à un site de destination spécifique. Cette organisation est très utilisée pour les livraisons «personnalisées» entre fournisseurs industriels et clients distributeurs. Le premier type est plus utilisé en messagerie par exemple. Pour autant, ce travail se centre sur les systèmes de transport avec consolidation (mutualisation dans le cas présent) pour des flux «industriels».

Comme cela a été montré dans le Chapitre 2, la consolidation du fret dans un réseau intégré se fonde essentiellement sur deux approches, par les hubs et par les moyens de transport. Ce qui débouche sur deux types de problèmes qui concernent la conception de réseau de distribution avec **centre de consolidation** (hub) et le **PTV** (Problème de Tournée de Véhicules). Le dernier sera discuté à la fin du chapitre. Nous nous focalisons par la suite sur les problématiques et les modèles existants en matière de conception de réseaux.

4.3.1.1 Problématiques de la conception de réseaux de distribution au niveau du transport

Dans le contexte de la grande distribution, cette section est consacrée à l'analyse des problèmes liés au problème du transport lors de la conception de réseaux de distribution (**TDNDP, Transportation Distribution Network Design Problem**).

En général, le DNDP (*Distribution Network Design Problem*) consiste à « *définir les meilleurs schémas de transfert des marchandises des sites d'approvisionnement aux points de demande en choisissant la structure du réseau (échelons, le nombre et la localisation des*

infrastructures logistique, etc.) tout en minimisant les coûts globaux » (Ambrosino et Grazia Scutella, 2005). Au regard des coûts, celui du transport et des stocks en sont les deux composantes plus importantes à optimiser, donc plus précisément le TINDP (*Transportation-Inventory Network Design Problem*). Dans la littérature, il existe de nombreux travaux liés à ce problème, par exemple (Blumenfeld et al., 1985), (Burns et al., 1985), (Hall, 1987), (Bertazzi et al., 1997), (Tyan et al., 2003), (Ambrosino et Grazia Scutella, 2005) et (Shu et al., 2005), qui ont tous l'objectif de minimiser la somme des coûts de transport et de stockage. Mais par rapport à l'objectif d'étude lié à la réduction des émissions logistiques, seule l'activité de transport sera considérée lors de la conception de réseaux, autrement dit le TDNDP. En effet, en dehors des produits à température dirigée, exclus ici, les émissions de CO₂ liées au stockage sont négligeables par rapport au transport.

(O'Kelly et Miller, 1994) déclinent le problème général de la conception de réseau en 4 sous-problèmes : (1) identifier la stratégie optimale (quantité et localisation) des hubs ; (2) affecter les nœuds (sites fournisseurs ou distributeurs) aux hubs ; (3) déterminer les liens entre les hubs ; et (4) déterminer les chemins logistiques liés aux flux. En dépit du fait que le TDNDP focalise particulièrement sur la minimisation du coût de transport, ces 4 sous-problèmes sont également à adresser dans notre cas.

Au préalable rappelons que le problème de transport pur et le TDNDP ne sont pas exactement identiques. Le transport, comme le décrivent les modèles analysés ensuite, part en général d'un graphe complet, par exemple les flux du transport sont probablement dans les deux sens entre sites *i* et *j*. En revanche, la conception de réseau de distribution repose sur un graphe partiel en raison des flux à sens unique par exemple de fournisseur *i* à distributeur *j*, mais l'arc *j-i* est interdit dans le graphe. Bien que les modèles discutés dans cette section soient en général liés au problème de transport, ils peuvent également être appliqués à la conception de réseaux en rajoutant des contraintes spécifiques. Donc, ils sont présentés comme des modèles TDNDP dans les discussions suivantes.

Le TDNDP définit les schémas logistiques qui généralement minimise le coût de transport pour livrer l'ensemble de produits *P* dans un réseau *G=(N,A)*, où *N* est l'ensemble de sommets qui sont les nœuds connus et *A* est les arcs non négatifs à définir en fonction de l'interconnexion des nœuds (O'Kelly et Miller, 1994). Dans la plupart des modèles au niveau du transport, il est fait l'hypothèse que les sommets du graphe ont en même temps des flux en

entrée et en sortie, c'est-à-dire qu'il existe des flux de i à j et de j à i ($i, j \in N$) dans le réseau. C'est un graphe complet. L'objectif des modèles est de localiser un certain nombre de hubs parmi l'ensemble des candidats N , puis d'affecter les non-hub nœuds aux hubs localisés. En conséquence, il s'agit de ***location-allocation*** problème pour la première fois discuté dans (Cooper, 1963).

Le TDNDP est traditionnellement formulé par la **PLNE (Programmation Linéaire en Nombres Entiers)**, ou **MILP (Mixed Integer Linear Programming)**, de type **NP-Difficile** (Ernst et Krishnamoorthy, 1998). La complexité du problème est fonction à la fois du nombre des nœuds et de la complexité du réseau à concevoir.

4.3.1.2 Modèles de conception des réseaux *Origine-Destination*

La première problématique est la localisation des sites qui couvrent l'ensemble de points retenus puis l'affectation des points aux sites localisés par les schémas de transport direct, autrement dit, et on l'appelle ici le **LA-DT (location-allocation by Direct Transportation)**. Les problèmes pratiques concernés sont par exemple la localisation des plateformes distributeurs qui approvisionnent les points de vente, ou de façon comparable la localisation des dépôts qui regroupent les flux d'un ensemble d'usines. Dans ce type de réseau, les hubs ne sont pas concernés, voir la Figure 4.7.

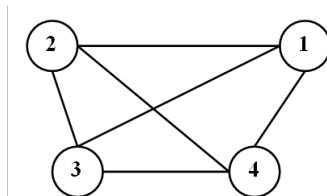


Figure 4.7 : Exemple du réseau O-D

(Daskin, 1995) et (Crainic et Laporte, 1997) classent ce genre de problème en trois catégories. **(1) le *Covering problème*** qui vise à minimiser le nombre de sites qui couvrent tous les points de retenus soumis à la distance maximale permise. Il sert à la conception de réseaux avec une contrainte sur le budget de construction de nouveaux sites ; **(2) le *Center problème*** qui minimise la distance maximale entre les sites localisés et les points retenus, et qui est souvent lié au problème avec la limite de temps de transport entre deux sites et points ; **(3) le *Median problème*** qui minimise la somme des distances parcourues dans le réseau, ainsi que le coût de transport. D'après la définition des trois problèmes, les deux premiers ne

sont pas concernés par rapport à l'objectif de ce travail. Donc la suite se concentre sur le troisième, le *Median* problème.

En général, le modèle de base consiste à minimiser les coûts composés par deux parties : un **coût fixe** lié à l'ouverture de l'arc (ou l'ouverture de la plateforme) et un **coût variable de transport** selon le flux transporté sur l'arc correspondant. Par exemple, le modèle ci-dessous discuté dans (Crainic, 2000) est la forme générale pour concevoir un réseau ayant P types de produits en déterminant les sites j qui approvisionnent les points de demandes i :

$$\min \sum_{ij \in A} f_{ij} y_{ij} + \sum_{ij \in A} \sum_{p \in P} c_{ij}^p x_{ij}^p \quad 4.21$$

Sujet à $\sum_{j \in N} x_{ij}^p - \sum_{j \in N} x_{ji}^p = d_i^p, i \in n, p \in P \quad 4.22$

$$\sum_{p \in P} x_{ij}^p \leq u_{ij} y_{ij}, ij \in A \quad 4.23$$

$$y_{ij} \in \{0,1\}, ij \in A \quad 4.24$$

Les formules ci-dessus sont reprises de la fonction objectif et des contraintes principales du modèle dans (Crainic, 2000). La fonction objectif (4.21) minimise le coût d'ouverture f_{ij} de l'arc ij (si l'arc ij est ouvert $y_{ij}=1$, sinon 0) et le coût de transport sur l'arc (c_{ij}^p coût de transport par unité du produit p sur l'arc ij , x_{ij}^p la quantité du produit p transporté sur l'arc). Le modèle permet l'interconnexion entre l'ensemble des nœuds N , d'où $A=N^2$. La contrainte (4.22) a pour but d'assurer que la demande du produit p au point de demande i , le d_i^p , doit être satisfaite. La contrainte (4.23) est une contrainte spécifique pour les problèmes concernant la capacité des arcs : la taille de flux sur l'arc ij ne peut pas dépasser sa capacité u_{ij} .

Le modèle de base dessus peut être modifié selon les conditions préalables lors de la conception. Par exemple, si le coût d'ouverture des arcs, ou des sites, n'est pas pris en compte, la fonction objectif peut être simplifiée en supprimant la première partie. De plus, si la capacité des sites n'est pas considérée, le facteur u_{ij} peut être dépouillé et la contrainte (4.23) doit être transformée comme suit :

$$\sum_{p \in P} x_{ij}^p \leq y_{ij} \cdot Z, ij \in A \quad 4.23'$$

Avec Z une constante grande. Les contraintes (4.23) et (4.23') indiquent également la décision d'ouverture des arcs. **Dans le cadre de restructuration d'un réseau, on considère qu'il n'y a pas de coût d'ouverture ou d'émissions liées à l'ouverture. Ce terme pourrait cependant être intégré ainsi que la capacité des sites.**

De plus, si seules les interconnexions entre les sites à localiser et les points connus sont permises, i et j doivent représenter strictement respectivement les points connus O et les sites localisés D , d'où $A=O \times D$. Ainsi, la contrainte (4.22) doit être décrite simplement comme $\sum_{j \in O} x_{ji}^p = d_i^p$.

Ou si une contrainte sur le nombre des sites à localiser P est imposée, le problème devient un **P -Median problème** (Daskin, 1995). Autrement dit, le nombre de sites localisés sur l'ensemble des candidats ne doit pas dépasser le nombre entier P . Par conséquent, la variable y_{ij} se transforme en y_j qui dénote la décision de l'ouverture du site j . Enfin, il faut ajouter la contrainte ci-dessous :

$$\sum_{j \in O} y_j = P \quad 4.25$$

Les contraintes (4.24) avec la variable binaire y_{ij} et (4.25) assurent que le nombre des sites ouverts par le modèle correspond à P .

Etant donné que le facteur c_{ij}^p dans la fonction objectif (4.21) est le coût de transport par unité du produit est indépendant de la distance de l'arc ij . (Daskin, 1995) et (Nozick et Turnquist, 1998) modifient le modèle en remplaçant le c_{ij}^p par le facteur α qui est le coût de transport par unité de produit transporté et par unité de distance parcourue, supposé d'être identique pour tous les arcs dans le réseau (le même modèle est présenté dans (Nozick et Turnquist, 2001)). La fonction objectif devient alors (4.26) avec l'introduction de d_{ij} la distance de l'arc ij :

$$\min \alpha \sum_{ij \in A} \sum_{p \in P} d_{ij} x_{ij}^p \quad 4.26$$

Le coût de transport, hors le coût d'ouverture, dépend alors uniquement de la distance et du flux sur l'arc. Dans ce cadre, la capacité des moyens de transport n'est pas prise en compte, or on a vu dans le Chapitre 2 que la fragmentation des flux conduit à une dégradation des taux de remplissage, il conviendra donc de réintégrer ce paramètre.

4.3.1.3 Modèles de la conception des réseaux à deux ou trois maillons

Les problèmes discutés ci-dessus sont tous basés sur le transport direct entre sites d'origine et sites de destination, donc le nombre de variables est de l'ordre $O(n^2)$. Considérons maintenant le problème de la conception de réseaux avec un ou plusieurs niveau(x) de centres de consolidation (hubs).

Par rapport au *P-Median* problème, le problème ici concerne les centres intermédiaires, hubs, entre les paires de noeuds $i-j$. Donc, il peut être défini comme le **HMP, ou P-HM (*P-hub Median* problème)** présenté dans (Campbell, 1996), voir aussi (Ahuja et al., 1993) et (Daskin, 1995), etc., ou le **HALP (*Hub Arc Location Problem*)** comme l'a nommé (Campbell et al., 2005a). Quelque soit son nom, s'agit de localiser les hubs et d'affecter les transports de i à j via un ou plusieurs hubs, en minimisant les coûts de transport.

De plus, du fait de l'introduction des hubs intermédiaires, l'affectation des noeuds aux hubs est une nouvelle problématique. Considérant qu'un noeud pourra être affecté à un seul ou plusieurs hub(s), le problème se décompose en deux termes : **SA pour Single-Allocation et MA pour Multi-Allocation**. Ces deux stratégies pourront être éventuellement mises en œuvre en fonction de l'organisation de réseaux. Or, mathématiquement le problème SA peut être considéré comme un cas particulier du MA : chaque noeud a une seul connexion avec un hub. On peut aussi envisager que la modélisation du SA se fonde principalement sur celle du MA.

En général, le problème consiste à définir le graphe $G=(N,A)$, en identifiant la localisation des hubs sur l'ensemble de noeuds N , voir la Figure 4.8. Comme les exemples illustrés dans cette figure, l'interconnexion des non-hub noeuds est permise dans le *O-H-D* réseau, mais pas dans le réseau *O-H-H-D*.

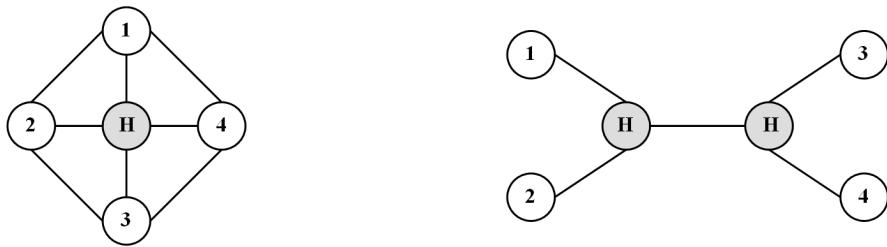


Figure 4.8 : Exemple des réseaux O-H-D et O-H-H-D

Il existe plusieurs façons de modéliser le HMP général. En rapport avec le réseau mutualisé à concevoir dans ce travail, nous allons discuter trois types de modélisation qui sont traditionnellement utilisés pour formuler le HMP : les modèles de **Campbell, Skorin-Kapov et al.**, et de **Ernst et Krishnamoorthy**.

D'abord, au niveau de l'affectation des nœuds, on peut classifier les problèmes en deux catégories : le **HMP-MA (*Multiple Allocation P-hub Median Problem*)** auquel les non-hub nœuds peuvent être possiblement affectés à plusieurs hubs, et le **HMP-SA (*Single Allocation P-hub Median Problem*)** auquel chaque non-hub nœud est affecté à un seul hub, comme défini dans (Skorin-Kapov et al., 1996).

Au niveau du **HMP-MA**, **Campbell** présente le modèle ci-dessous dans (Campbell, 1994) et (Campbell, 1996) :

$$\min \sum_{i \in N} \sum_{m \in N} \sum_{n \in N} \sum_{j \in N} W_{ij} c_{ijmn} X_{ijmn} \quad 4.27$$

Sujet à $\sum_m \sum_n X_{ijmn} = 1, i, j \in N \quad 4.28$

$$\sum_m y_m = P \quad 4.29$$

$$y_i \in \{0,1\}, i \in N \quad 4.30$$

$$0 \leq X_{ijmn} \leq y_m, i, j, m, n \in N \quad 4.31$$

$$0 \leq X_{ijmn} \leq y_n, i, j, m, n \in N \quad 4.32$$

Le modèle illustré ci-dessus est cité de (Campbell, 1996). La variable X_{ijmn} est la fraction des flux passés par les schémas $i-m-n-j$ de la totalité des flux de i à j qui y est notée comme W_{ij} . Au niveau des contraintes, (4.28) assure que tous les flux de la paire $i-j$ sont transportés via les hubs, et (4.30), (4.31) et (4.32) interdisent la circulation des flux sur les arcs non ouverts. Le nombre de hubs ouverts est limité par le nombre entier P dans la contrainte (4.29) et l'ouverture du hub i est décidée par la variable binaire y_i .

Particulièrement, dans la fonction objectif, Campbell définit le coût de transport comme $c_{ijmn} = c_{im} + \alpha c_{mn} + c_{nj}$, en proposant d'utiliser le **facteur de réduction (discount factor) $\alpha=[0, 1]$** sur le coût unitaire de transport des schémas de transport intermédiaires. L'introduction du facteur α représente le fait le coût de transport sur les schémas inters (entre hubs M-N), est en général moindre que celui des schémas amont ou aval en raison de l'effet d'économie d'échelle sur le transport après la consolidation. Spécialement, (Campbell et al., 2005a) indiquent que, si le facteur de réduction $\alpha=0$, le HMP ci-dessus est identique avec le *Median* problème général.

Se basant sur le modèle de Campbell, (Skorin-Kapov et al., 1996) indiquent que les contraintes (4.31) et (4.32) ne sont pas assez strictes et, donc, ils proposent les deux contraintes suivantes qui les remplacent :

$$0 \leq \sum_n X_{ijmn} \leq y_m, \quad i, j, m \in N \quad 4.33$$

$$0 \leq \sum_m X_{ijmn} \leq y_n, \quad i, j, n \in N \quad 4.34$$

En conservant la fonction objectif et les autres contraintes du modèle Campbell, le modèle **Skorin-Kapov et al.** a pour but de renforcer les contraintes pour avoir la relaxation continue plus stricte. Car les solutions qui satisfassent les contraintes (4.33) et (4.34) satisfassent également (4.31) et (4.32), mais pas vice versa (Skorin-Kapov et al., 1996). Le nombre de contraintes est ainsi réduit de $2n^3(n-1)$.

Afin de simplifier le modèle au niveau du nombre de variables, (Ernst et Krishnamoorthy, 1998), voir aussi (Ernst et Krishnamoorthy, 1996), proposent une autre manière de modéliser le problème. En indiquant que la variable X_{ijmn} génère $O(n^4)$ variables et que ceci rend le modèle très difficile à résoudre lors de l'accroissement de la variable binaire n , **Ernst et Krishnamoorthy** construisent le modèle en déplaçant X_{ijmn} :

$$\min \sum_{i \in N} [\sum_{m \in N} \chi d_{im} Z_{im} + \sum_{m \in N} \sum_{n \in N} \partial d_{mn} Y_{mn}^i + \sum_{n \in N} \sum_{j \in N} \delta d_{nj} X_{nj}^i] \quad 4.35$$

Sujet à $\sum_m y_m = P \quad 4.36$

$$\sum_m Z_{im} = O_i, i \in N \quad 4.37$$

$$\sum_n X_{nj}^i = W_{ij}, i, j \in N \quad 4.38$$

$$\sum_n Y_{mn}^i + \sum_j X_{mj}^i - \sum_n Y_{nm}^i - Z_{im} = 0, i, m \in N \quad 4.39$$

$$Z_{im} \leq O_i y_m, i, m \in N \quad 4.40$$

$$X_{nj}^i \leq W_{ij} y_n, i, j, n \in N \quad 4.41$$

$$X_{nj}^i, Y_{mn}^i, Z_{ik} \geq 0, i, j, m, n \in N \quad 4.42$$

$$y_i \in \{0,1\}, i \in N \quad 4.43$$

Dans ce modèle, les variables principales sont Z_{im} (flux du produit i sur l'arc origine-hub), Y_{mn}^i (flux du produit i sur l'arc hub-hub) et X_{nj}^i (flux du produit i sur l'arc hub-destination), en supposant que chaque point d'origine i a un seul type de produit i . Ernst et Krishnamoorthy définissent que le coût unitaire de transport est fonction à la fois de la distance parcourue et de la taille de flux transporté, donc $c_{ijmn} = \chi d_{im} + \alpha d_{mn} + \delta d_{nj}$, et le facteur de réduction α est normalement plus petit que les deux autres coefficients. Cette présentation du coût de transport correspond également et elle n'a pas d'impact sur la complexité du problème. Les formules (4.37)-(4.39) correspondent aux différentes contraintes sur l'équilibrage des flux dans le réseau. Et (4.40) et (4.41) garantissent qu'aucun flux ne circule sur les arcs fermés.

Les trois modèles, Campbell, Skorin-Kapov et al., et Ernst et Krishnamoorthy, ont été comparés dans l'étude (Campbell et al., 2005b). Il est indiqué que le modèle Ernst et Krishnamoorthy a deux avantages importants. Premièrement, ce modèle est plus flexible pour les problèmes génériques, la modification de la fonction (4.35) et certaines contraintes pour équilibrer les flux étant facile à mettre en œuvre. Enfin, une telle définition des flux permet

surtout de réduire le nombre de variables à O(n³), ainsi que le nombre de contraintes de n³-2n²-n, ceci est un avantage considérable de ce modèle. Du fait des ces avantages, **le modèle Ernst et Krishnamoorthy est retenu comme modèle de base pour modéliser les réseaux de distribution dans ce travail.**

Les modèles ci-dessus sont tous du type HMP-MA. Maintenant nous allons examiner une autre branche de ce genre de problème : **HMP-SA** (rappel : *Single Allocation P-hub Median Problem*). Puisque la mutualisation consiste en la mise en commun des ressources dont les plateformes logistiques, le HMP-SA peut être éventuellement concerné dans le cas où les flux sont mutualisés dans un seul centre. En effet, les deux types de problème, *Single ou Multiple Allocation*, peuvent être modélisés pratiquement par la même fonction objectif et la différence se trouver essentiellement au niveau des contraintes.

Par exemple, pour modéliser le HMP-SA, (Campbell, 1996) propose d'ajouter les contraintes suivantes :

$$\sum_j \sum_n (W_{ij} X_{ijmn} + W_{ji} X_{jinm}) = \sum_j (W_{ij} + W_{ji}) Z_{im}, \quad i, m \in N \quad 4.44$$

$$0 \leq Z_{im} \leq y_m, \quad i, m \in N \quad 4.45$$

dans son modèle (4.27)-(4.32) du HMP-MA, en remplaçant en même temps les contraintes (4.31) et (4.32) par (4.45). La variable binaire Z_{im} est ajoutée dans le modèle et $Z_{im}=1$ si le non-hub noeud i est affecté au hub m , sinon 0. La contrainte (4.44) assure que le i est affecté au seul hub m : quand $Z_{im}=1$, la somme des flux en provenance de i et en destination de l'ensemble de destinations J ($\sum_j X_{ij}$) doit être égale à la somme flux de i à tous les J en passant par l'arc $i-m$ ($\sum_j \sum_n W_{ij} X_{ijmn}$). Par conséquent, les flux qui partent de i ne peuvent pas passer par un hub autre que m . En plus, (4.45) affecte les nœuds non-hubs aux hubs ouverts.

Subséquemment, (Skorin-Kapov et al., 1996) indiquent que la contrainte (4.44) n'est pas assez stricte sur les flux et cela induit des résultats d'optimisation largement au dessous de la valeur optimum. A cette fin, ils proposent un nouveau modèle avec la relaxation continue plus stricte :

$$\min \sum_{i \in N} \sum_{m \in N} \sum_{n \in N} \sum_{j \in N} W_{ij} c_{ijmn} X_{ijmn} \quad 4.46$$

Sujet à $\sum_m y_m = P, \quad m \in N \quad 4.47$

$$\sum_m Z_{im} = 1, \quad i \in N \quad 4.48$$

$$0 \leq Z_{im} \leq y_m, \quad i, m \in N \quad 4.49$$

$$\sum_n X_{ijmn} = Z_{im}, \quad i, j, m \in N \quad 4.50$$

$$\sum_m X_{ijmn} = Z_{jn}, \quad i, j, n \in N \quad 4.51$$

$$y_m, Z_{im} \in \{0,1\}, \quad i, m \in N \quad 4.52$$

La contrainte (4.41) est remplacée par les (4.50) et (4.51) en rajoutant la contrainte (4.48) qui est très importante dans le modèle, car ces contraintes (4.48) et (4.52) stipulent qu'il existe maximum un hub pour chaque non-hub nœud et les contraintes (4.50) et (4.51) forcent les flux de i à j à passer par m et n si $Z_{im}=Z_{nj}=1$.

Par rapport au modèle Campbell, Skorin-Kapov et al. révèlent que, grâce aux contraintes plus strictes, leur modèle est capable d'améliorer le problème d'optimisation du HMP-SA , à la fois au niveau de la qualité des résultats et du temps d'optimisation, voir leur étude (Skorin-Kapov et al., 1996).

En effet, le modèle Skorin-Kapov et al. a été réalisé en se basant sur l'étude (O'Kelly, 1987) dans laquelle O'Kelly a utilisé une fonction objectif 0/1 quadratique pour modéliser ce genre de problème :

$$\min \sum_{i \in N} \sum_{m \in N} \sum_{n \in N} \sum_{j \in N} W_{ij} (Z_{im} c_{im} + \alpha Z_{im} Z_{nj} c_{mn} + Z_{nj} c_{nj}) \quad 4.53$$

Sujet à $\sum_m Z_{im} = 1, i \in O, D; m \in M, N \quad 4.54$

$$\sum_m y_m = P, m \in M, N \quad 4.55$$

$$y_m, y_n, Z_{im}, Z_{nj} \in \{0,1\}, i \in O, m \in M, n \in N, j \in D \quad 4.56$$

$$0 \leq Z_{im} \leq y_m, i \in O, m \in M \quad 4.57$$

$$0 \leq Z_{nj} \leq y_n, j \in D, n \in N \quad 4.58$$

En fait, l'application du modèle ci-dessus est très limitée par la complexité de calcul à cause de la fonction 0/1 quadratique, donc sa résolution utilise souvent des méthodes heuristiques pour résoudre ce problème. Afin de rendre la fonction linéaire, (Skorin-Kapov et al., 1996) proposent de remplacer $Z_{im}Z_{nj}$ par X_{imnj} , la variable issue du modèle Campbell. De ce fait, le modèle Skorin-Kapov et al. est obtenu. De plus, les modèles Campbell et Skorin-Kapov et al. obtiendront, sous réserve de temps de calcul, la solution exacte par la formulation en PLNE.

En s'appuyant sur les modèles dessus, (Ernst et Krishnamoorthy, 1996) proposent un modèle qui formalise différemment le HMP-SA :

$$\min \sum_{i \in N} \sum_{m \in M} d_{im} Z_{im} (\chi O_i + \delta D_i) + \sum_{i \in N} \sum_{m \in N} \sum_{n \in N} \partial d_{mn} Y_{mn}^i \quad 4.59$$

Sujet à $\sum_j W_{ij} = O_i$ et $\sum_i W_{ji} = D_i, i \in N$ 4.60

$$\sum_m Z_{im} = 1, i \in N \quad 4.61$$

$$\sum_m y_m = P, m \in N \quad 4.62$$

$$0 \leq Z_{im} \leq y_m, i, m \in N \quad 4.63$$

$$\sum_n Y_{mn}^i - \sum_n Y_{nm}^i = O_i Z_{im} - \sum_j W_{ij} Z_{jm}, i, m \in N \quad 4.64$$

$$y_m, Z_{im} \in \{0,1\}, i, m \in N \quad 4.65$$

$$Y_{mn}^i \geq 0, i, m, n \in N \quad 4.66$$

Ce modèle ressemble au modèle du HMP-MA présenté dessus et dans (Ernst et Krishnamoorthy, 1998). La variable non négative Y_{mn}^i représente les flux du produit i entre hubs $m-n$, et Z_{im} et Z_{nj} sont les variables binaires qui signifient respectivement l'ouverture des arcs $i-m$ et $n-j$. Soumis à l'hypothèse que chaque non-hub nœud n'est affecté à qu'un hub, par exemple si i est affecté à m , le flux sur l'arc $i-m$ doit égaler la somme de l'offre ou de la demande du site i , comme l'est défini par (4.64). C'est la raison pour laquelle O_i et D_j sont directement introduits dans la fonction objectif au lieu d'avoir les variables de flux. Par conséquent, le nombre de variables est réduit à n^3+n^2 .

Pour résumer, il a été étudié l'état de l'art en matière de la modélisation du TDNDP, dans le cas particulier d'absence de contrainte de **capacité et de coût fixe pour les hubs**. En matière des réseaux à plusieurs échelons, et de la localisation des hubs dans les réseaux, le problème devient HMP ou \mathcal{P} HMP (rappel : *\mathcal{P} -hub Median Problem*). Ce problème vise à déterminer la meilleure stratégie sur les hubs au niveau de la quantité autorisée, la localisation, l'affectation des nœuds, ainsi que les transports. Se basant sur l'affectation des nœuds, il existe deux sous-problèmes : HMP-MA (*Multiple Allocation HMP*) et HMP-SA (*Single*

Allocation HMP). Comme le montre leur nom, ils portent sur la décision d'affecter chaque nœud à un ou plusieurs hubs.

Principalement, nous avons examiné les trois types de modèles traditionnels liés au HMP : Campbell, Skorin-Kapov et al., et Ernst et Krishnamoorthy. Le modèle O’Kelly est relativement moins utilisé en raison de la fonction objectif 0/1 quadratique. Ces trois modèles peuvent être considérés comme base pour construire de nouveaux modèles vis-à-vis des problèmes de transport spécifiques. Du fait d’une modélisation différente du problème, on peut comparer ces trois modèles au niveau de leur complexité, voir le Tableau 4.2.

Modèles	Campbell		Skorin-Kapov et al.		Ernst et Krishnamoorthy	
Variable dominante	X_{ijmn}		X_{ijmn}		$Z_{im} + Y_{mn} + X_{nj}$	
MA/SA	HMP-MA	HMP-SA	HMP-MA	HMP-SA	HMP-MA	HMP-SA
Nombre de variables	$n^4 + n$	$n^4 + n^2$	$n^4 + n$	$n^4 + n^2$	$2n^3 + n^2 + n$	$n^3 + n^2$
Nombre de contraintes	$2n^4 + n^2 + 1$	$3n^2 + 1$	$2n^3 + n^2 + 1$	$2n^3 + n^2 + n + 1$	$n^3 + 3n^2 + n + 1$	$2n^2 + n + 1$

Tableau 4.2 : Complexité des modèles du problème HMP (non capacité et non coût fixe sur hub)

La comparaison dans le Tableau 4.2 se base sur le nombre de variables et de contraintes générées par le modèle. Il est assez évident que **le modèle Ernst et Krishnamoorthy exige moins de variables et de contraintes** et cela lui permet de résoudre le problème en utilisant moins de mémoire et de ressources CPU lors de l’optimisation. Donc ce modèle est relativement plus efficace pour les problèmes quand n est grand. De ce fait, ce modèle est considéré comme la formulation pertinente pour formuler le réseau logistique dans ce travail, car la mutualisation consiste également à mettre en commun les plateformes entre de nombreux participants, et le nombre de variables n est grand car il s’agit non pas d’un réseau logistique mais de la mutualisation de plusieurs réseaux logistiques réels.

Une remarque importante concerne les modèles analysés, ainsi que d’autres dans la littérature, car la plupart de ceux-ci font l’hypothèse que le coût de transport est une fonction linéaire du flux transporté par unité de distance parcourue. Cette hypothèse induit le fait que les modèles discutés ci-dessus sont pratiquement équivalents à la minimisation de la distance pour des coûts constants ramenés au flux et à la distance (Ernst et Krishnamoorthy, 1998). Les autres facteurs comme le taux de chargement ou le nombre de moyens nécessaires ne sont pas pris en compte dans les modèles lors de l’optimisation. C’est la raison pour laquelle, il ressort

que cette hypothèse génère probablement des résultats approximatifs sur la localisation de hubs (O'Kelly et Bryan, 1998).

Comme l'a montré la partie 4.1, les émissions de CO₂ du transport sont liées à la charge et à la distance. Il sera donc nécessaire de reprendre les fonctions objectifs linéaires dans les modèles présentés ci-avant pour évaluer plus correctement la performance écologique des schémas mutualisés.

4.3.2 Intération de la fonction d'émissions de CO₂ aux modèles du TDNDP

Au niveau du TDNDP, comme l'illustre la partie précédente, la plupart des modèles étudiés simplifient le problème en faisant l'hypothèse que le coût de transport est parfaitement proportionnel aux flux transportés. Cette hypothèse ne sera pas retenue dans le modèle à construire qui vise à minimiser les émissions de CO₂ des moyens de transport, car nous avons montré que la modélisation précise des émissions implique une **Fonction Linéaire par Morceaux Discontinus (FLM et LFMD) ou Discontinuous Piecewise Linear Function**, voir la Figure 4.2. Par conséquent, l'objectif d'émission impacte la formulation de la fonction objectif lors de la création du modèle.

Le problème de la modélisation du coût de transport par la fonction linéaire par morceaux a retenu relativement moins d'attentions dans le domaine de la conception de réseaux logistiques. L'étude de ce problème peut remonter jusqu'à la proposition de la **fonction concave liée au coût de transport**. Par rapport au transport direct du fournisseur au client, le transport via hub peut éventuellement induire une consolidation de flux puis une économie d'échelle en transport, mais également une période de temps supplémentaire au hub pour réaliser la consolidation. De ce fait, (Blumenfeld et al., 1985) et (Burns et al., 1985) déterminent que la dépendance du coût de transport à l'égard des flux après consolidation peut être présentée par un fonction concave. De plus, (Kuehn et Hamburger, 1963) et (O'Kelly et Bryan, 1998) indiquent que l'on doit tenir compte de cette concavité sur le coût de transport pour le problème de la localisation de hub. Cependant, en raison de la complexité du problème, il est utile d'approcher la fonction concave par la une FLM (Klincewicz, 1990), par exemple celle de la Figure 4.9. (Chan et al., 2002) illustre une fonction concave du coût de transport correspond à deux caractéristiques essentielles : (1) c'est une fonction non décroissante de la quantité expédiée, et (2) le coût de transport par unité de flux est non croissant par rapport à la quantité expédiée. En général, ce type de problème correspond à la

fonction montrée dans la Figure 4.9 qui démontre un exemple de ce type de FLM, dont FC_q et α_q sont le coût fixe et le facteur de réduction du coût de transport liés au segment q , et on a normalement $\alpha_1 \geq \alpha_2 \geq \alpha_3, \dots, \geq \alpha_q \geq 0$. Dans des cas particuliers, la fonction peut également prendre une forme discontinue, comme le montre la Figure 4.10 ci-après. Par exemple, (Croxton et al., 2003b) illustre que, lorsque les marchandises sont transportées en TL (*full Truckload*), le coût de transport est en fonction du nombre de camions nécessaires d'après la capacité. Cela conduit à une fonction de coût linéaire par morceaux discontinu. C'est précisément le cas des flux de la grande distribution.

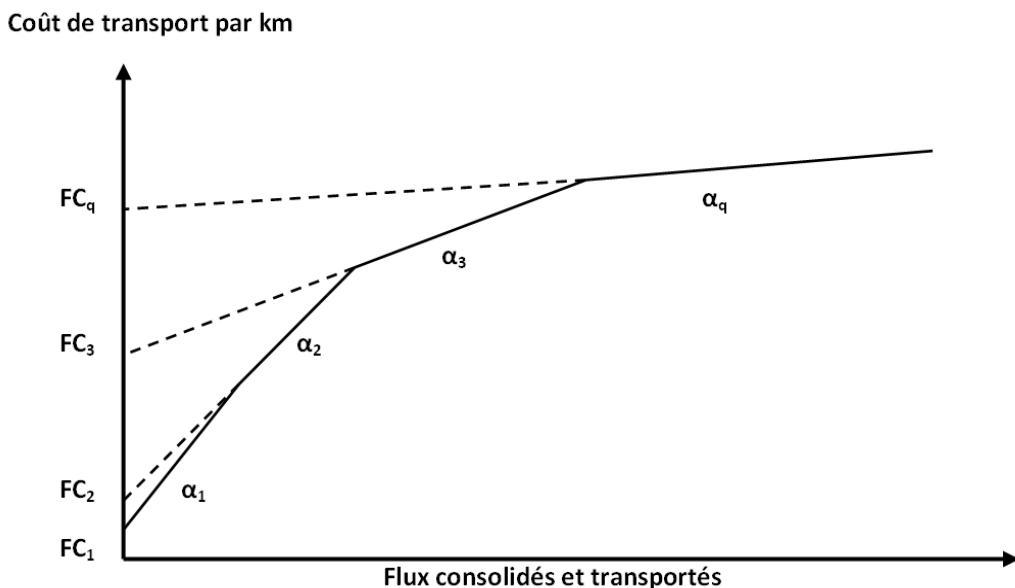


Figure 4.9 : Exemple d'une fonction linéaire concave par morceaux

Afin de modéliser le coût de transport par la FLM, comme le montre la Figure 4.9, (O'Kelly et Bryan, 1998) proposent une formulation dans son étude portant sur le problème de la localisation de hubs en considérant l'économie d'échelle par la consolidation. Avec cet objectif, le modèle ci-dessous a été utilisé pour modéliser le coût de transport dans un réseau de trois échelons O-M-N-D, dont M et N sont les hubs à localiser :

$$\min \sum_i \sum_j \sum_m \sum_n W_{ij} (c_{im} + c_{jn}) X_{ijmn} + \sum_q \sum_m \sum_n c_{mn} (\partial_q R_{qmn} + FC_q Y_{qmn}) \quad 4.67$$

Sujet à : $\sum_q R_{qmn} = \sum_i \sum_j W_{ij} X_{ijmn}, \quad m, n \in N : m \neq n \quad 4.68$

$$R_{qmn} - Y_{qmn} \sum_i \sum_j W_{ij} \leq 0, \quad q \in Q, m, n \in M \quad 4.69$$

$$X_{mmnn} \geq y_m + y_n - 1, \quad m, n \in N \quad 4.70$$

$$\sum_q Y_{qmn} - X_{mmnn} = 0, \quad m, n \in N : m \neq n \quad 4.71$$

$$Y_{qmn} \in \{0, 1\}, \quad q \in Q, m, n \in M \quad 4.72$$

Les notions W_{ij} , c_{ij} , y_i , et X_{ijmn} sont reprises des modèles discutés dans le paragraphe 4.3.1.1, avec pour chaque segment q de la courbe par morceaux, α_q le facteur de réduction du coût de transport lié au segment (représente la pente du segment) ; FC_q le coût fixe lié au segment (représente l'interception du segment) ; R_{qmn} la somme des flux sur l'arc inter-hubs $m-n$ associée par le facteur α_q ; Y_{qmn} la variable binaire qui vaut 1 si les flux sur R_{qmn} sont associés à un coût fixe FC_q , sinon 0.

Ce modèle est comparable avec ceux discutés dans le paragraphe 4.3.1.1. La fonction objectif a pour but de minimiser la somme du coût de transport du réseau, dont la première partie liée au transport amont et aval et la deuxième partie pour les transports inter-hubs. Les contraintes présentées ci-dessus sont des contraintes spécifiques pour lier les flux inter-hubs à la FLM. La contrainte (4.68) calcule la somme des flux passant par l'arc $m-n$. La contrainte (4.69) assure que la pente α_q et l'interception FC_q sont liées au même segment q . La contrainte (4.70) garantit que, si les flux du hub m au hub n sont passé par l'arc $m-n$, $X_{mmnn}=1$, les deux hubs m et n doivent être ouverts. Enfin, la contrainte (4.72) a pour but de lier la somme des flux sur l'arc $m-n$ au un seul segment q .

Le modèle ci-dessus est évidemment une possibilité pour modéliser non seulement le coût de transport en linéaire par morceaux mais il va générer aussi un grand nombre de variables au niveau de la fonction objectif.

Nous supposons que des modèles comme celui Ernst et Krishnamoorthy (voir le paragraphe 4.3.1.1) pourrait être plus efficace à la condition que nous puissions imposer les contraintes spécifiques de la FLM dans ce modèle. A cette fin, nous adaptons une méthode de formulation présentée dans (Croxton et al., 2003a). Dans ce travail, Croxton et al. révèlent qu'il existe au moins trois manières afin de modéliser la FLM :

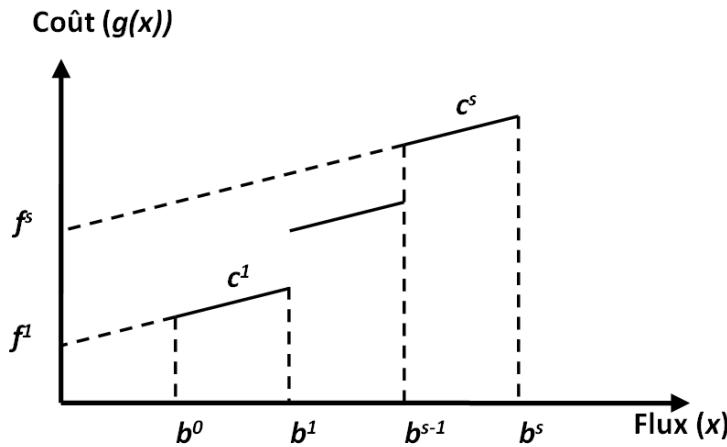


Figure 4.10 : Exemple de la fonction linéaire par morceaux discontinus

Modèles	IM (Incremental Model)	MCM (Multiple Choice Model)	CCM (Convex Combination Model)
Fonction objectif	$g(x) = \sum_s c^s z^s + f^s y^s$	$g(x) = \sum_s c^s z^s + f^s y^s$	$g(x) = \sum_s u^s (c^s b^{s-1} + f^s) + \lambda^s (c^s b^s + f^s)$
Contraintes spécifiques	$\hat{f}^s = (f^s + c^s b^{s-1}) - (f^{s-1} + c^{s-1} b^{s-1})$; $x = \sum_s z^s$; $(b^s - b^{s-1})y^{s+1} \leq z^s \leq (b^s - b^{s-1})y^s$; $y^s \in \{0,1\}$;	$x = \sum_s z^s$; $b^{s-1}y^s \leq z^s \leq b^s y^s$; $\sum_s y^s \leq 1$; $y^s \in \{0,1\}$;	$x = \sum_s (u^s b^{s-1} + \lambda^s b^s)$; $u^s + \lambda^s = y^s$; $\sum_s y^s \leq 1$; $u^s, \lambda^s \geq 0, y^s \in \{0,1\}$;

Tableau 4.3 : Trois modélisations de la fonction linéaire par morceaux (Croxton et al., 2003a)

Le tableau illustre les trois types de modélisation de la FLM, dans (Croxton et al., 2003a) il est fait l'hypothèse que la fonction est semi continue inférieurement $g(x) \leq \liminf_{x' \rightarrow x} g(x')$, cf.

la Figure 4.10. Mais, plus généralement, ces formulations sont également adaptables pour la fonction continue comme celle de la Figure 4.9. Dans la Figure 4.10, f^s et c^s sont respectivement l'interception et la pente du segment $s \in S$, et b^{s-1} et b^s sont respectivement la borne inférieure et supérieure en axe x du segment s . De plus, la taille des flux de chaque segment z^s ne doit pas dépasser la borne inférieure et supérieure, b^{s-1} et b^s , donc $b^{s-1}y^s \leq z^s \leq b^s y^s$ avec $y^s = 1$ si $z^s > 0$, sinon 0. Particulièrement, le modèle CCM utilise deux facteurs pondérés

pour estimer la valeur z^s en fonction de sa position par rapport aux bornes inférieures et supérieures, autrement dit $z^s = u^s b^{s-1} + \lambda^s b^s$ et $y^s = u^s + \lambda^s$.

(Croxton et al., 2003a) prouvent que **ces trois modèles sont équivalents à l'égard de la complexité d'optimisation et du temps de calcul**. Cette conclusion peut être également retrouvée dans (Kameshwaran et Narahari, 2007) qui se base sur le problème du sac à doc. On peut donc choisir la formulation qui est la plus adaptée au problème traité. En effet, la différence importante entre ces trois modèles est que les MCM et CCM supposent que les flux sont liés au plus à un segment, mais l'IM rend les flux possiblement attachés à plusieurs segments. Par conséquent, les MCM et CCM correspondent mieux à ce travail, puisque l'on calcule les émissions de CO₂ avec la somme de flux transportés ensemble, ainsi chaque flux est lié à un seul segment. De plus, par rapport au CCM, le MCM est plus simple pour modéliser la fonction d'émissions, car tous les segments sont linéaires avec la pente c^s identique. Donc, les facteurs pondérés du CCM ne sont pas nécessaires.

De ce fait, **le MCM est finalement choisi** dans ce travail afin de modéliser la fonction d'émissions de CO₂ qui est en linéaire par morceaux semi discontinus. Dans le paragraphe prochain, il est expliqué comment cette formulation est appliquée dans le modèle de la conception de réseaux de distribution, pour créer un modèle minimisant les CO₂ émis par le transport du fret.

4.3.3 Crédit d'un modèle d'aide à la décision pour définir un réseau logistique minimisant une fonction d'émission

Cette section est consacrée à l'introduction d'une fonction d'émission, en l'occurrence le CO₂ du transport aux modèles de la conception de réseaux logistiques ou à leur adaptation, dans l'objectif de créer un nouveau modèle. Comme l'a montré la recherche bibliographie, ce type de modèle n'existe actuellement pas encore au niveau de la conception de réseaux et la FLM n'est pas utilisée pour modéliser les émissions de CO₂ du transport.

4.3.3.1 Un modèle proche : le modèle Croxton

Dans la littérature, Croxton expose un modèle qui est proche de celui visé ici (Croxton et al., 2007). Ce travail concerne la conception d'un réseau Origines-Destinations avec multi-produits en minimisant le coût de transport. Spécialement, le problème est formulé par la

PLNE avec la FLM liée au coût de transport (appelé le PLCNFP : *Piecewise Linear Cost Network Flow Problem*). A cette fin, le modèle MCM présenté dans le Tableau 4.3 est adopté. Là encore, les auteurs révèlent que la fonction n'est pas nécessairement continue, mais afin d'assurer que le modèle apporte des solutions optimales, il est assumé que la fonction est semi-continue inférieurement, comme la Figure 4.11 le montre, et $g(0)=0$.

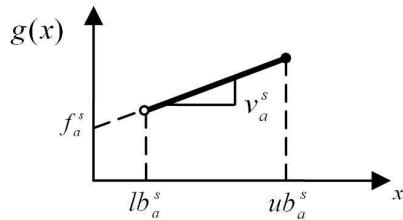


Figure 4.11 : Définition des paramètres de la fonction linéaire par morceaux $g(x)$

Le modèle proposé dans (Croxton et al., 2007) a pour but de minimiser le coût de transport composé par deux parties qui sont le coût fixe et le coût variable et qui sont respectivement associés par les paramètres f_a^s et v_a^s (segment $s \in S_a$ et arc $a \in A$) dans la Figure 4.11. Donc, on a le modèle ci-dessous au niveau de la conception du réseau $G=(N,A)$:

$$\text{Min} \sum_a \sum_s f_a^s y_a^s + v_a^s x_a^s \quad 4.73$$

$$\text{Sujet à : } Mx^k = d^k, \quad k \in K \quad 4.74$$

$$x_a = \sum_k x_a^k, \quad a \in A \quad 4.75$$

$$x_a = \sum_s x_a^s, \quad k \in K \quad 4.76$$

$$b_a^{s-1} y_a^s \leq x_a^s \leq b_a^s y_a^s, \quad a \in A; s \in S_a \quad 4.77$$

$$\sum_s y_a^s \leq 1, \quad a \in A \quad 4.78$$

$$x_a^k \geq 0, \quad a \in A, k \in K \quad 4.79$$

$$y_a^s \in \{0,1\}, \quad a \in A; s \in S_a \quad 4.80$$

Avec l'ensemble de produits K , d'arcs A et de segments S liés à l'arc a . La fonction objectif est une fonction classique qui minimise la somme des coûts de transport. La contrainte (4.74) consiste à balancer les flux multi-produits dans le réseau. À travers la matrice $M=|N|x|A|$ (où N est l'ensemble de nœuds), la demande du produit k du nœud j , noté $|d_j^k|$ (car on définit $d_j^k < 0$ pour les points de demande) doit être satisfait par l'offre du nœud i , noté d_i^k ($d_i^k > 0$ pour les points d'approvisionnement), et $d_i^k=0$ pour les nœuds en tant que point de transition. Les contraintes (4.75-76) ont pour objectif de définir le flux x_a sur l'arc a , qui est calculé des deux façons : la somme des produits k sur l'arc x_a^k ou la somme des flux liés à chaque segment s sur l'arc x_a^s . Les autres contraintes correspondent au MCM présenté dans le Tableau 4.3.

Afin d'améliorer le modèle ci-dessus, (Croxton et al., 2003b) proposent deux approches : **améliorer la relaxation PL et réduire le nombre de segments**. Cette dernière approche porte sur la simplification des coûts de transport, celle-ci est donc à analyser en détail dans les études de cas ci-après.

En ce qui concerne, la première approche, appelons le MB (Modèle Basique) pour le modèle ci-dessus. (Croxton et al., 2003b) et (Croxton et al., 2007) proposent deux modèles, le

MR (modèle renforcé) et le ME (Modèle Etendu) en utilisant respectivement les deux contraintes suivantes :

$$\text{Modèle Renforcé : } x_a^k \leq M_a^k \sum_s y_a^s, \quad a \in A, k \in K \quad 4.81$$

$$\text{Modèle Etendu : } x_a^{ks} \leq M_a^k y_a^s, \quad a \in A, k \in K, s \in S_a \quad 4.82$$

L'objectif des MR et ME est d'améliorer la relaxation PL de la contrainte (4.77) dans le MB ci-avant en imposant une borne supérieure au flux d'un produit sur un arc quelconque. La contrainte (4.81) du MR définit que le flux du produit k sur l'arc a , le x_a^k , est inférieur ou égale à la constante M_a^k si cet arc porte un flux et $\sum_s y_a^s = 1$, sinon $x_a^s = \sum_s y_a^s = 0$. La constante M_a^k est égale à la somme des approvisionnements (donc aussi à la somme des demandes) du produit k dans le réseau. Cette contrainte vise à désagréger les produits mais agréger les segments liés à l'arc. Afin d'avoir une contrainte encore plus stricte sur le x_a^k , on peut désagréger davantage les segments. De là, on a x_a^{ks} dans le ME qui signifie le flux du produit k sur l'arc a lié au segment s , dont la valeur ne peut pas dépasser le constant M_a^k . Par contre, cette opération de désagrégation fait augmenter le nombre de segments au niveau de calcul, car chaque segment est caractérisé par un type de produit.

Evidement, les MR et ME sont plus « serrés » que le MB, et le ME a la contrainte la plus forte. Cela est montré par les résultats de (Croxton et al., 2007), les deux modèles MR et ME sont capables d'améliorer considérablement la qualité de l'optimisation, car ils disposent des contraintes supplémentaires qui resserrent la taille des flux. Surtout, lors de l'interception du premier segment $f_a \neq 0$, les MR et ME peuvent améliorer l'optimisation mesurée en gap de 50% à 3% approximativement. Or, le temps de calcul pour les MR et ME est corrélativement plus long, car ils demandent plus d'opérations au niveau du calcul (la désagrégation des flux). Donc, on a la comparaison sur la qualité d'optimisation comme ME>MR>>MB, mais au contraire pour le temps d'optimisation. D'ailleurs, vu l'amélioration importante de la qualité d'optimisation, il est considéré que les MR et ME sont plus performants.

Les résultats concernant les réseaux avec multi-produits et $f_a \neq 0$ (Croxton et al., 2007) démontre que le ME offre en général des résultats d'optimisation meilleurs que ceux du MR, mais il consomme aussi plus de temps de calcul (avec un facteur quatre pour certains cas par rapport au MR). En outre, il existe une convergence sur la qualité de résultats lorsque le

problème devient plus complexe. Ce résultat a été également prouvé dans l'étude (Croxton et al., 2003b). Il est constaté que le MR résolu par l'algorithme Branch-and-Bound offre des résultats comparables avec ME mais il consomme moins de CPU temps et de mémoire lors de l'optimisation. De ce fait, (Croxton et al., 2003b) ont choisi le MR pour modéliser un problème de transport de Merge-in-Transit. En général, ces deux modèles sont retenus comme des possibilités pour améliorer le modèle basique et la sélection doit dépendre de la particularité du problème à résoudre. Dans ce travail, en raison de la taille des problèmes, le **MR est choisi** comme une démarche qui améliore le modèle. En effet, la contrainte (4.81) du MR est considérée comme une résolution de problème d'optimisation dans les études de cas et elle n'est pas concernée dans le modèle générique construit par la suite.

En général, le modèle présenté ci-dessus repose sur les réseaux directs O-D qui ne correspondent pas au périmètre de cette étude. Dans la section suivante, nous allons développer un modèle en se basant sur les principes de celui que l'on vient de présenter.

4.3.3.2 Proposition d'un modèle de minimisation des émissions dans un réseau à trois maillons

Rappelons que le périmètre de ce travail porte sur la mutualisation des réseaux de la grande distribution dans lesquels les chaînes concernées peuvent être globalement considérées comme **orientées et à trois maillons** : **O** (Site de production fournisseur) → **WH** (entrepôt fournisseur) → **PF** (plateforme distributeur) → **D** (ou PDV : points de vente). Comme le montre la Figure 4.12, la mutualisation qui vise à partager les ressources logistiques apporte des schémas possibles aux réseaux actuels. De fait, le modèle a pour objectif de définir de nouveaux schémas logistiques mutualisés en se basant sur les ressources existantes. Il s'agit de définir le graphe $G=(N,A)$, avec l'ensemble de nœuds $N=O \cup WH \cup PF \cup D$ et l'ensemble d'arcs $A=O \times WH \cup WH \times PF \cup PF \times D$, voir la Figure 4.12. De plus, dans le graphe G , il est strictement défini que les sites fournisseurs O sont les sommets entrées et les PDV distributeurs D sont les sorties, les hubs intermédiaires WH et PF sont les sites isolés.

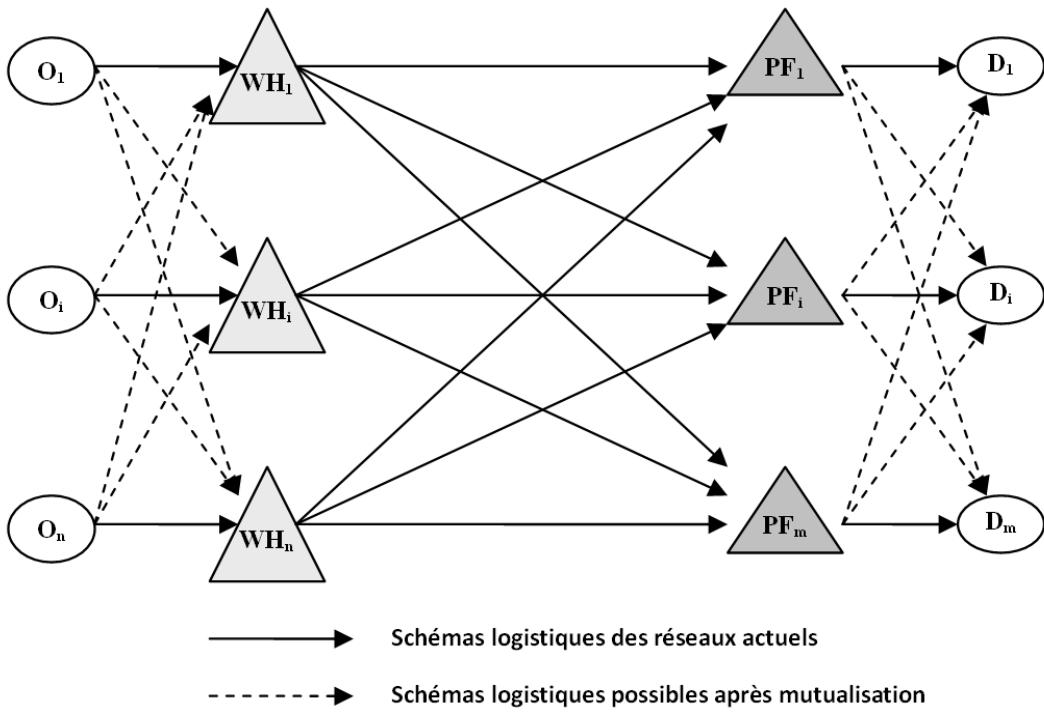


Figure 4.12 : Exemple des schémas logistiques actuels et après mutualisation

Au niveau de la modélisation, la conception du réseau mutualisé ressemble au Location-Allocation problème. D'après la Figure 4.12, les flux d'origine O_i se concentrent dans le réseau afin d'obtenir une économie d'échelle du transport pour arriver à destination D_i . Selon le modèle Ernst et Krishnamoorthy discuté dans le paragraphe 4.3.1, on peut utiliser la variable x_a^k pour tracer les flux du produit k sur chaque arc $a \in A$. De plus, par rapport à l'objectif du modèle qui porte sur la minimisation des émissions de CO₂ du transport, le flux x_a^k représente une certaine valeur d'émissions et cette valeur est traduite par une fonction d'émissions linéaire par morceaux. Le modèle Croxton discuté dans la section précédente est donc appliqué à cette modélisation.

De plus, certaines hypothèses, ou prémisses, sont nécessaires afin de modéliser le problème :

(a) : étant donné que la mutualisation ne cherche pas à implanter de nouveaux hubs mais à partager les existants parmi les acteurs, le coût d'ouverture n'est pas nécessaire. En plus, on fait l'hypothèse que la capacité des hubs n'est pas mise en cause. Donc c'est un problème de localisation sans **capacité et sans coût d'implantation** ;

(b) : le problème consiste principalement à affecter les sites O et D respectivement aux entrepôts et plateformes mutualisées. Cette affectation pourrait être identique ou variante

d'une période à l'autre en fonction des expéditions ou des livraisons. De ce fait, nous proposons d'imposer un index t qui signifie la période t dans l'horizon de temps T (par exemple en nombre de semaines) sur la variable de flux, on obtient x_{at}^k . Cet index sert uniquement à garantir une même affectation des produits aux hubs sur l'horizon. Par ailleurs la livraison des flux est effectuée strictement semaine par semaine afin de garantir le taux de service hebdomadaire ;

(c) : la fonction d'émissions de CO₂ est linéaire par morceaux et semi-continue inférieurement $g(x) \leq \liminf_{x' \rightarrow x} g(x')$, et on définit aussi que $g(0)=0$. La définition des variables de segment se conforme à la Figure 4.11.

En conséquence, le modèle ci-dessus est obtenu pour le problème de conception d'**un réseau de distribution en trois échelons avec multi-produits et multi-périodes** :

Fonction objectif :

$$\min CO_2 : \sum_{t \in T} \left[\sum_{om \in A_u} d_{om} \varepsilon(x_{omt}) + \sum_{mn \in A_m} d_{mn} \varepsilon(x_{mnt}) + \sum_{nd \in A_d} d_{nd} \varepsilon(x_{ndt}) \right] \quad 4.83$$

Avec la fonction linéaire par morceaux discontinu:

$$\varepsilon(x_{at}) = f_a^s y_a^s + v_a^s z_{at} \quad 4.84$$

Contraintes de linéaire par morceaux :

$$x_{at} = \sum_{s \in S_a} z_{at}^s ; \quad a \in A, t \in T \quad 4.85$$

$$x_{at} = \sum_{k \in K} x_{at}^k ; \quad a \in A, t \in T \quad 4.86$$

$$lb_a^s y_a^s \leq z_{at}^s \leq ub_a^s y_a^s ; \quad a \in A, t \in T, s \in S_a \quad 4.87$$

$$\sum_{s \in S_a} y_a^s \leq 1 ; \quad a \in A \quad 4.88$$

$$y_a^s \in \{0,1\} ; \quad a \in A, s \in S_a \quad 4.89$$

$$z_{at}^k \geq 0 ; \quad a \in A, t \in T, k \in K \quad 4.90$$

Contraintes d'équilibre des flux :

$$x_{at}^k \geq 0 ; \quad a \in A, t \in T, k \in K \quad 4.91$$

$$\sum_{m \in M} x_{omt}^k = R_{ot}^k ; \quad o \in O, t \in T, k \in K \quad 4.92$$

$$\sum_{n \in N} x_{ndt}^k = B_{dt}^k ; \quad d \in D, t \in T, k \in K \quad 4.93$$

$$\sum_{o \in O} x_{omt}^k = \sum_{n \in N} x_{mnt}^k ; \quad m \in M, t \in T, k \in K \quad 4.94$$

$$\sum_{m \in M} x_{mnt}^k = \sum_{d \in D} x_{ndt}^k ; \quad m \in M, t \in T, k \in K \quad 4.95$$

Contraintes d'affectation des hubs :

$$p_{omt}^k \in \{0,1\}; o \in O, m \in M, t \in T, k \in K \quad 4.96$$

$$x_{omt}^k \leq p_{omt}^k \cdot Z; o \in O, m \in M, t \in T, k \in K \quad 4.97$$

$$\sum_{m \in M} p_{omt}^k = 1; o \in O, t \in T, k \in K \quad 4.98$$

$$p_{omt}^k = p_{omt'}^k; o \in O, m \in M, t \in T, k \in K \quad 4.99$$

$$q_{ndt} \in \{0,1\}; d \in D, n \in N, t \in T \quad 4.100$$

$$x_{ndt}^k \leq p_{omt}^k \cdot Z; o \in O, m \in M, t \in T, k \in K \quad 4.101$$

$$\sum_{n \in N} q_{ndt} = 1; d \in D, t \in T \quad 4.102$$

$$q_{ndt} = q_{ndt'}; d \in D, n \in D, t \in T \quad 4.103$$

Contraintes d'ouverture des hubs :

$$H_{it} \in \{0,1\}; i \in M \cup N, t \in T \quad 4.104$$

$$\sum_{i \in M} H_{it} = P \text{ et } \sum_{i \in N} H_{it} = P'; t \in T \quad 4.105$$

$$x_{omt}^k \leq H_{mt} \cdot Z; o \in O, m \in M, t \in T, k \in K \quad 4.106$$

$$x_{ndt}^k \leq H_{nt} \cdot Z; o \in O, m \in M, t \in T, k \in K \quad 4.107$$

Avec :

Z : une constante grande ;

T : l'horizon de temps (par exemple en nombre de semaines) ;

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

O, M, N, D : l'ensemble des sites des fournisseurs (O), les WH en tant que candidats des Hubs Amont (M), les PF en tant que candidats des Hubs Aval (N) et les destinations (D);

P ou P' : un nombre entier qui définit le nombre maximal de hubs amont ou aval ouverts. Par exemple, si $P=|M|$ et $P'=|N|$, il signifie que tous les WH et PF concernés sont retenus comme candidats des sites mutualisés (hubs amont et aval) ;

A_u, A_m, A_d : sous-ensembles de l'ensemble des arcs A avec A_u l'ensemble des arcs amont om , A_u pour les arcs inter-hubs mn et A_d les arcs aval nd ; et on a bien $A = A_u \cup A_m \cup A_d$.

a : arc élément et $a \in A$;

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

$\varepsilon(x)$: fonction des émissions de CO₂ de transport liée au flux x ;

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

B^k_{dt} : quantité du produit k demandé au PDV $d \in D$ à la semaine t ;

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

s : segment linéaire de la fonction $s \in S_a$;

f_a^s : valeur fixée et non négative de l'interception du segment s sur l'arc a , elle est identique pour tous les arcs et segments. Particulièrement, elle est égale aux émissions de CO₂ d'un moyen de transport parcouru à vide, donc on a $f_a^s \neq 0$.

v_a^s : pente du segment s sur l'arc a , qui est identique pour dans tous les arcs et segments. Elle représente les émissions de CO₂ en fonction de la charge de moyen ;

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

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

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

x_{at} : somme de flux sur l'arc a à la semaine t .

Variables de décision :

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

p_{omt}^k : variable binaire avec $p_{omt}^k=1$ si le flux du produit k passe par l'arc $om \in A_u$ à la semaine t , sinon 0;

q_{ndt} : variable binaire avec $q_{ndt}=1$ si la destination $d \in D$ est servi par le hub aval $n \in N$ à la semaine t , sinon 0;

H_{it} : variable binaire, vaut 1 si le hub $i \in M \cup N$ est ouvert à la semaine t , sinon 0 ;

La fonction objectif consiste à minimiser la somme des émissions de CO₂ des trois échelons du réseau logistiques sur l'horizon de temps. Dans le cas où les autres objectifs sont proposés dans le modèle, par exemple le coût de transport qui a été modélisé dans le paragraphe 4.2.1, il est possible de changer cette fonction par une autre qui correspond à l'objectif souhaité. Pour comprendre le modèle, les contraintes sont divisées en quatre groupes selon leur fonction :

➤ **Contraintes de la fonction linéaire par morceaux** : les contraintes dans ce groupe reprennent celles du modèle MCM. Les contraintes (4.85-86) définissent que le flux sur l'arc doit égaler la somme des flux liés aux segments et aussi égaler la somme des produits sur l'arc. Puis les contraintes (4.87-89) assurent qu'il existe au plus un segment qui porte des flux non nuls. Et la valeur de flux x_{at} est traduite en valeur d'émissions par la fonction (4.84).

➤ **Contraintes d'équilibre des flux** : Il s'agit des contraintes traditionnelles pour équilibrer les flux dans le réseau. La formule (4.92) garantit que les flux du produit k en provenance du site o sur les arcs en amont égalent l'offre R_{ot}^k . Et les demandes du k du site d , B_{dt}^k , doivent être satisfaites par les flux en aval. En plus, les contraintes (4.94-95) assurent qu'aucun produit n'est consommé par les sites de transition M et N ;

➤ **Contraintes d'affectation des hubs** : ce groupe cherche à définir les schémas de transport en amont et aval qui sont présentés par les deux variables binaires : p_{omt}^k et q_{ndt} . Elles reflètent si l'arc ij est choisi ou non. Les contraintes (4.98) et (4.102) signifient que c'est un SA (*Single-Allocation*) problème. Autrement dit, chaque site o ou d est affecté

respectivement à un seul m ou n. De plus, (4.99) et (4.103) déterminent que cette affectation reste la même sur l'horizon de temps. Dans le cas du MA (Multiple Allocation) problème, il suffit de supprimer ces quatre contraintes afin de libérer l'affectation des sites ;

➤ **Contraintes d'ouverture des hubs :** il s'agit de limiter le nombre de hubs amont ou aval par un nombre entier P ou P' . Ce principe est similaire du *P-hub Median* Problème discuté dans le paragraphe 4.3.1.1. Les contraintes (4.106-107) garantissent que les flux ne sont liés qu'aux hubs ouverts. Selon le principe de la mutualisation, on a $P \leq |M|$ et $P' \leq |N|$. L'objectif de la proposition de ce groupe de contraintes est que la mutualisation apportera éventuellement une diminution du nombre de WH ou PF demandé par le réseau du fait que les sites seront utilisés de façon plus efficace après mutualisation. Donc, il sera intéressant d'étudier la sensibilité du résultat au nombre de sites mutualisés (retenu parmi ceux existants) à l'amélioration du problème.

A part la fonction objectif linéaire par morceaux qui vise particulièrement l'objectif de minimiser les émissions de CO₂, le modèle construit ci-dessus est un modèle générique vis-à-vis du problème de la conception de réseaux mutualisés. Par ce modèle, le problème est formulé en PLNE. Or, nous devons préalablement indiquer que, lors de l'application de ce modèle générique, certaines contraintes pourront éventuellement ne pas se présenter si elles ne sont pas concernées dans le problème dans les études de cas. De plus, la complexité introduite par la fonction objectif entraînera en outre des hypothèses pour améliorer le calcul. Ces résolutions sont décidées en fonction des caractéristiques du problème étudié. Pour des exemples, on peut se reporter aux deux chapitres suivants sur les études de cas.

4.3.4 Problème de tournée de véhicules

L'opération de transport en tournée de véhicules est également considérée comme une approche de mutualisation dans cette thèse, car elle correspond au principe de la consolidation au niveau du moyen de transport. Par rapport au problème de la conception de réseaux, le PTV (Problème de Tournée de Véhicules), ou VRP (*Vehicle Routing Problem*) en anglais, est relativement moins concerné par ce travail de recherche puisqu'il s'inscrit au niveau tactique/opérationnel. Donc, nous n'allons pas examiner en détail ce problème, mais uniquement présenter les modèles qui sont utilisés dans ce travail pour faire des tournées mutualisées au niveau régional.

Parmi ces branches, **le CVRP est le problème qui correspond à ce travail**, car la capacité des véhicules est une contrainte importante au niveau de la minimisation des émissions du transport. Selon la fonction d'émissions linéaire par morceaux, la quantité des CO₂ émis par km d'une livraison dépend à la fois de la charge de véhicule et du nombre de véhicules. Cela conduit à l'objectif de maximiser la charge des véhicules et ainsi de minimiser le nombre de véhicules nécessaires, ainsi que la distance parcourue. C'est la raison pour laquelle le CVRP est le modèle retenu dans cette section. A cette étape, les autres problèmes du VRP qui sont relativement moins importants pour l'objectif de l'étude ne sont pas étudiés. Mais ils seront éventuellement pris en considération pour des contraintes opérationnelles et cela permet de donner des perspectives pour les travaux à venir liés à ce sujet.

Nous allons examiner l'impact de la minimisation des émissions de CO₂ sur le problème CVRP, puis l'impact sur les modèles retenus pour ce travail.

4.3.4.1 CVRP avec un objectif de réduction des émissions de CO₂

Dans la littérature, les modèles d'optimisation liés au CVRP portent sur l'approche exacte ou une heuristique, pour un panorama des modèles, on peut se référer à (Laporte, 1992), (Guéret et al., 2002) et (Toth et Vigo, 2002). Les problématiques classiques sont souvent fondées sur **la minimisation des distances parcourues, du temps de transport, ou du coût de transport**. Cependant, en termes d'écologie, jusqu'à maintenant il n'existe pas encore un algorithme exact qui vise à minimiser directement les émissions de CO₂ liées aux tournées. Par rapport aux problèmes classiques, la difficulté est que les émissions d'un arc AB dépendent à la fois la distance de l'arc mais aussi des charges accumulées avant cet arc (ex : selon l'ordre de visite des points, la charge du camion sur l'arc AB comprend la charge du point A ainsi que les charges collectées avant le point A, par exemple la charge du point A-1, qui font aussi partie les émissions de l'arc AB), il s'agit donc d'un **problème de programmation dynamique**. Sachant que ce problème d'optimisation n'est pas le cœur du sujet de recherche dans cette thèse, au lieu de créer un nouveau modèle d'optimisation, nous avons utilisé des modèles existants pour évaluer la performance des schémas logistiques en tournée de véhicules.

En ce qui concerne les émissions de CO₂ des tournées, il n'existe pas d'approche exacte pour résoudre ce type de problème jusqu'à ce jour. Ce n'est d'ailleurs que récemment que certains travaux abordent le problème d'émissions sur le VRP par des approches heuristiques.

Par exemple, l'étude de cas (Ubeda et al., 2010), qui est en rapport avec la thèse de Palmer (Palmer, 2007), cherche à «verdir» le réseau de distribution urbain concernant un dépôt et 12 points de livraison avec transport par tournées (le problème de livraison ou de collecte en tournées est mathématiquement identiques si les trajets à vide ne sont pas pris en compte, car ils ont les mêmes contraintes à respecter. Donc les discussions ci-après portent sur le problème de collecte de flux). En maintenant le niveau de service aux clients, Ubeda et al. déclinent qu'il y a trois possibilités pour réduire le CO₂ du transport organisé en tournée :

- **Re-planifier les tournées** : il s'agit d'organiser les tournées de façon plus efficace par rapport au cas actuel. Cette démarche repose sur l'optimisation des données principalement en minimisant les distances parcourues lors des tournées pour visiter tous les points. Cela est un sujet classique et très étudié en matière de CVRP et le modèle sera discuté ci-après.

- **Réduire les trajets à vide** : c'est la réduction des trajets retours au dépôt à la fin de tournées, autrement dit c'est le VRPB. Ce genre de problème est un autre sujet important du VRP. Dans le travail de Ubenda (Ubeda et al., 2010), cette approche a été réalisée par la déduction des distances parcourues par camion à vide sur l'ensemble des distances parcourues. Evidemment, cela induit une réduction des émissions importantes, car les émissions à vide représentent une part importante des émissions en charge.

Les deux premières démarches ont pour objectif de minimiser les tournées, ainsi que les distances parcourues. Autrement dit, ces solutions réduisent les émissions de façon indirecte.

- **Minimiser les émissions de CO₂ lors des livraisons**, qui cherche les schémas les moins polluants lors de l'affectation des tournées. S'appuyant sur la thèse (Palmer, 2007), Ubeda et al. étudient une approche heuristique qui minimise les émissions de CO₂ des tournées en deux étapes. La première repose sur une optimisation par une matrice d'émissions sur chaque arc. Il est fait l'hypothèse que les arcs sont indépendants, comme cela les émissions de l'arc $i-j$ ne dépendent que de la charge collectée au point i et de la distance d_{ij} . Donc, la matrice d'émissions pourrait être définie comme $e_{ij} = d_{ij} \times \varepsilon(q_i)$, où d_{ij} est la distance entre i et j et $\varepsilon(q_i)$ est la valeur des émissions (par km) de la charge du point i , la q_i . Donc au lieu de minimiser la somme de distances d_{ij} , il est possible de définir les schémas logistiques qui minimisent la somme d'émissions e_{ij} . Pourtant, ces schémas ne sont pas les solutions optimums puisque l'ordre des tournées d'une route n'est pas pris en compte dans le

modèle. Donc, il faut ensuite réaliser une deuxième étape d'optimisation en s'appuyant sur les résultats de l'étape 1, elle consiste à organiser l'ordre des visites parmi les points de chaque tournée définie et qui a réduit les émissions. En effet, plus le camion est chargé plus les émissions sont importantes.

Dans l'objectif de minimiser de façon directe les émissions de CO₂ des tournées, l'approche heuristique présentée ci-dessus ramène le problème de programmation dynamique à un problème de PLNE. Le problème est ainsi simplifié au niveau de sa complexité. Le modèle construit n'offre cependant pas une résolution exacte. Dans (Ubeda et al., 2010), le modèle est proposé pour une étude de cas ayant un dépôt et 12 points à visiter, mais ils envisagent que, si le nombre de points augmente, cette approche reste difficile à mettre en œuvre.

Pour comparer ces trois approches, selon les résultats de l'étude (Ubeda et al., 2010), il s'avère que le deuxième, minimiser les trajets à vide, est plus efficace pour réduire les émissions par rapport aux deux autres démarches, cela correspond bien à la conclusion de l'étude (Dejax et Crainic, 1987) : les trajets à vides sont une partie importante de l'amélioration du transport au niveau stratégique/tactique. Or, sachant que le problème de repositionner les véhicules (les trajets à vide), est au niveau tactique/opérationnel, il n'est pas discuté dans le cadre de cette thèse.

Par ailleurs, (Ubeda et al., 2010) trouvent que la première démarche sur la minimisation des distances parcourues et la troisième sur la minimisation des émissions sont quasi identique en terme de performance, soit inférieur à 1% de différence entre la réduction de distance ou d'émissions. Il n'existe pas une supériorité sensible entre l'un et l'autre. Cette conclusion est identique avec (Palmer, 2007). La raison principale est que la fonction objectif de la troisième démarche n'est pas sensiblement plus sensible, car elle ne prend en compte que les émissions des arcs indépendants lors de la première étape d'optimisation. De plus, la deuxième étape d'optimisation dans l'objectif d'organiser l'ordre des visites lors des tournées peut éventuellement offrir une amélioration marginale. Prenons un exemple simple : nous allons ramasser les flux de deux points numérotés 2 et 3 avec flux respectifs q₂ et q₃ (émissions des flux $\varepsilon(q_i)$), puis livrer à un entrepôt numéroté 1. En rejetant les trajets à vide, les deux possibilités de calculer les émissions de CO₂ sont $E_{231}=d_{23}*\varepsilon(q_2)+d_{31}*\varepsilon(q_3+q_2)$ ou $E_{321}=d_{23}*\varepsilon(q_3)+d_{21}*\varepsilon(q_1+q_2)$, donc la différence est de $\Delta=d_{23}*[e(q_2)-e(q_3)]+(d_{31}-d_{21})*\varepsilon(q_3+q_2)$.

A la condition que la distance d_{23} n'est pas assez grand et $\varepsilon(q_2) \approx \varepsilon(q_3)$, et $d_{31} \approx d_{21}$, la différence est négligeable. Ces conditions correspondent souvent aux cas de multi-pick classiques : les points de ramassage sont souvent assez proche et relativement loin de l'entrepôt à livrer. C'est pourquoi, (Ubeda et al., 2010) ont trouvé que les deux démarches ont une performance comparable. Or, dans un cas particulier, par exemple les distances entre nœuds sont importantes, le résultat pourra être différent. Mais cela ne correspond à notre étude de cas du chapitre suivant.

Compte tenu du résultat précédent nous minimiserons la distance pour minimiser indirectement le CO₂ sur les tournées de véhicules, **nous avons choisi la première approche qui minimise les distances pour minimiser les émissions de CO₂ du transport en tournée.** Il existe des modèles qui fournissent la résolution exacte dans la littérature pour ce genre de problème.

4.3.4.2 Modèles existants en matière de CVRP

Le CVRP traditionnel optimise des trajets en tournée portant par exemple la totalité des distances parcourues pour la collecte (ou la livraison) de flux (les autres objectifs comme le coût de transport, le temps de transport, etc. ne sont pas considérés à cette étape). De plus, il est nécessaire de respecter la capacité des véhicules. Dans le contexte de la collecte des flux de fournisseurs puis la livraison à une plateforme distributeur, le CVRP peut être défini comme suit :

On suppose que $G=(N,A)$ est un graphe complet, avec l'ensemble de sommets $N=\{1,\dots,n\}$ et l'ensemble d'arcs $A=N\times N$. Les sommets $j=2,\dots,n$ correspondent aux sites des fournisseurs où il y des flux non négatifs q_j à collecter, alors que le sommet $j=1$ correspond à la plateforme distributeur à livrer. Particulièrement, la boucle (i,i) n'est pas permise. De plus, une valeur d_{ij} non négative est associée à l'arc $(i,j)\subseteq A$, qui correspond la distance entre i et j .

Le CVRP consiste à déterminer les tournées m en satisfaisant les quatre contraintes principales comme indiqué dans (Kara et al., 2004) : a) chaque tournée commence et termine par la plateforme ; b) chaque site fournisseur doit être visité une et une seule fois ; c) les flux collectés accumulés dans chaque tournée ne doivent pas dépasser la capacité de véhicule Q ; d) la somme des distances parcourues par les tournées doit être minimisée, cela est de fait l'objectif du problème.

Ce problème peut être formulé par des modèles différents. D'abord, les modèles à deux-index ou à trois-index sont possibles comme le montre dans (Laporte, 1992), et ceux à trois-index du CVRP sont particulièrement utilisés dans les cas où la capacité des véhicules dans la flotte n'est pas identique et il est utile de distinguer les véhicules par l'index k . Etant donné que cela ne correspond pas à la condition de ce travail, nous centrons sur les modèles à deux-index.

Selon une revue sur les algorithmes exacts liés au CVRP (Toth et Vigo, 2002), deux différentes formulations sont proposées dans la littérature pour modéliser ce genre de problème.

Le premier type de formulation se fonde sur un nombre exponentiel de variables binaires qui sont associées à chaque circuit faisable. Le modèle collecte d'abord tous les circuits possibles dans le graphe G , $\mathcal{H}=\{H_1, \dots, H_M\}$, dont chaque circuit H_j a une valeur (ex : la distance du circuit) d_j , de plus il est associé par une variable binaire x_j qui vaut 1 si le H_j est retenu dans la solution optimale qui minimise la somme des distances, sinon 0. Autrement dit, il correspond au *Set Partitioning Problem* (Toth et Vigo, 2002). Ce modèle a été proposé dans (Laporte et al., 1985) pour formuler un problème euclidien du VRP, et il est aussi a été discuté dans (Toth et Vigo, 2002).

De fait, la première formulation n'est pas beaucoup utilisée dans la littérature pour formuler le CVRP. En effet, la première étape du modèle va collecter tous les circuits possibles et donc générer une base de solution en nombre exponentiel de variables binaires. Cet inconvénient est de plus en plus évident avec l'augmentation de la taille de problème. C'est la raison pour laquelle, (Toth et Vigo, 2002) annoncent que le deuxième type de formulation qui sera présenté est plus fréquemment utilisé dans la littérature.

Le deuxième modèle se base sur la PLNE, comme le modèle ci-dessous cité de (Toth et Vigo, 2002) le montre, voir aussi (Guéret et al., 2002) et (Kara et al., 2004) :

$$\min \sum_{i,j \in N, i \neq j} d_{ij} x_{ij} \quad 4.108$$

Sujet à : $\sum_{j=2}^n x_{1j} = m \quad 4.109$

$$\sum_{i=2}^n x_{i1} = m \quad 4.110$$

$$\sum_{j=1; j \neq i}^n x_{ij} = 1 \quad (i=2, \dots, n) \quad 4.111$$

$$\sum_{i=1; i \neq i}^n x_{ij} = 1 \quad (j=2, \dots, n) \quad 4.112$$

$$q_i \leq u_i \leq Q \quad (i=2, \dots, n) \quad 4.113$$

$$u_i - u_j + Qx_{ij} \leq Q - q_j \quad (i, j=2, \dots, n; i \neq j) \quad 4.114$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad (i, j=1, \dots, n; i \neq j) \quad 4.115$$

Dans ce modèle, la variable binaire X_{ij} qui vaut 1 si le site i est suivi immédiatement par le site j dans une tournée et 0 sinon. Q est la capacité de véhicule et elle est constante en faisant l'hypothèse que les véhicules sont identiques. q_i est la quantité de produits à ramasser au point $i=2, \dots, n$. De plus, la variable u_i correspond à la charge accumulée ramassée aux points lors du trajet allant du site 1 au site i inclus. Par exemple, dans une tournée donnée 1-2-6-9-11-1, le u_9 égale la somme de flux q_2, q_6 et q_9 (rappelons que 1 est la plateforme). Afin de respecter la contrainte de capacité et ramasser les flux, la valeur de u_i doit toujours être inférieure ou égale à la capacité Q et supérieure à la charge ramassée du point i .

La fonction objectif minimise la somme des distances parcourues (ou du coût de transport) et elle génère n^2 variables. Les contraintes (4.109) et (4.110) imposent la contrainte que chaque tournée m doit commencer et terminer par la plateforme, et les contraintes comparables (4.111) et (4.112) assurent que chaque sommet de fournisseur est visité exactement une fois. Les contraintes (4.113) et (4.114), qui sont élaborées d'après les contraintes de l'élimination de sub-tournées du TSP (*Traveling Salesman Problem*) étudiées dans (Miller et al., 1960), ont pour objectif de respecter la capacité de véhicule lors des

tournées. Pour plus de détails dans la détermination des contraintes, on peut se référer à (Toth et Vigo, 2002), (Guéret et al., 2002) et (Kara et al., 2004).

Particulièrement, Toth et Vigo relèvent que, quand $X_{ij}=0$, la contrainte (4.114) est redondante, car elle est équivalente à (4.113). Par conséquent, la (4.114) peut être renforcée en ajoutant des coefficients, comme la contrainte (4.116) ci-dessous proposée dans (Desrochers et Laporte, 1991) puis corrigée dans (Kara et al., 2004) :

$$u_i - u_j + Qx_{ij} + (Q - q_i - q_j)x_{ji} \leq Q - q_j \quad (i, j=2, \dots, n; i \neq j) \quad 4.116$$

La contrainte (4.116) évidemment plus stricte que (4.114), car elle impose une contrainte supplémentaire sur la valeur de u_i si $X_{ij}=0$ et $X_{ji}=1$. Cette contrainte est appliquée à une étude de cas dans (Guéret et al., 2002) pour optimiser un problème de livraison de fioul d'un dépôt à huit clients. De plus, Guéret et al. rajoutent une contrainte supplémentaire sur le modèle ci-dessus :

$$u_i \leq Q + (q_i - Q)x_{1i} \quad (i=2, \dots, n) \quad 4.117$$

La contrainte (4.117), avec (4.113) ci-avant, précise que, si le point i est le premier point visité après 1, $X_{1i}=1$, $u_i=q_i$. En effet, cette contrainte de renforcement n'est pas obligatoirement nécessaire, mais elle est capable de réduire certainement le temps de calcul, car elle rend la valeur de u_i plus serrée.

Avec cela, nous avons finalement obtenu le modèle complet :

$$\min \sum_{i \neq j} d_{ij} x_{ij} \quad 4.118$$

Sujet à : $\sum_{j=2}^n x_{1j} = m \quad 4.119$

$$\sum_{i=2}^n x_{i1} = m \quad 4.120$$

$$\sum_{j=1; j \neq i}^n x_{ij} = 1 \quad (i=2, \dots, n) \quad 4.121$$

$$\sum_{i=1; i \neq i}^n x_{ij} = 1 \quad (j=2, \dots, n) \quad 4.122$$

$$q_i \leq u_i \leq Q \quad (i=2, \dots, n) \quad 4.123$$

$$u_i \leq Q + (q_i - Q)x_{1i} \quad (i=2, \dots, n) \quad 4.124$$

$$u_i - u_j + Qx_{ij} + (Q - q_i - q_j)x_{ji} \leq Q - q_j \quad (i, j=2, \dots, n; i \neq j) \quad 4.125$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad (i, j=1, \dots, n; i \neq j) \quad 4.126$$

$$u_i \geq 0 \quad (i=2, \dots, n) \quad 4.127$$

Ce modèle avec la méthode exacte est appliqué aux études de cas dans cette thèse. L'avantage du modèle est qu'il génère n^2 variables par la fonction objectif et, par conséquent, il est préférable pour les problèmes avec une grande quantité de sommets, auxquels notre travail correspond.

Or, l'inconvénient important est constitué du fait que, malgré la contrainte (4.125) plus stricte, le modèle rencontre souvent la difficulté de trouver la solution optimale dans un certain temps. Comme le montre l'expérience de l'étude de cas dans ce travail, ce modèle avec le solveur de résolution CPLEX trouve en général très vite la première solution en nombres entiers, cependant la convergence des solutions en nombres entiers et de l'objectif de

la PL est lente, autrement dit, c'est difficile d'obtenir un gap<3%⁵⁰. C'est la raison pour laquelle, nous proposons d'introduire une contrainte supplémentaire sur la distance maximale d'un arc. Lorsque la valeur D est imposée sur la distance permise d'un arc du graphe, les arcs ne sont pas réalisables si $d_{ij}>D$. Cette démarche réduit considérablement le nombre de variables et ainsi simplifie le calcul. Par contre, elle dépouille en même temps l'espace des solutions possibles. De ce fait, la valeur de D doit être déterminée de façon prudente et en fonction du périmètre de l'étude de cas. Pour exemple, on peut se référer au Chapitre 6.

En conclusion, ce paragraphe est consacré au problème du VRP, et particulièrement le CVRP. Malgré le fait qu'il n'existe pas encore une méthode exacte sur la minimisation des émissions de CO₂ du CVRP, les modèles traditionnels, spécialement ceux qui reposent sur la minimisation de distance sont considérés comme des solutions pertinentes car il existe peu de différence sur le moyen de transport testé entre minimisation de la distance et du CO₂. En conséquence, il n'y a pas de création de modèle spécifique pour réduire les émissions au niveau du VRP dans ce travail. Ces résultats seront discutés au prochain chapitre.

4.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons recherché à formaliser les problèmes de modélisation des émissions en vue de leur minimisation dans des réseaux mutualisés. Cela conduit à la création d'un modèle d'optimisation permettant d'optimiser la performance en émission ou économique de moyens de transport. Pour ce faire, nous nous sommes premièrement concentrés sur la modélisation des émissions de CO₂ des camions et des trains, ainsi que sur la formulation du problème de la conception des réseaux mutualisés, cependant cette formulation pourrait être généralisée à d'autres moyens, à d'autres émissions et à d'autres problèmes de conception de réseaux logistiques. Deuxièmement, nous avons introduit les fonctions d'émissions obtenues, qui sont linéaire par morceaux discontinus, aux modèles d'optimisation du transport. Cette méthodologie a été également discutée dans (Croxton et al., 2007) qui porte sur un problème de transport direct Origine-Destination avec la fonction de coût linéaire par morceaux discontinus. Par rapport au modèle de Croxton, notre modèle vise le problème de transport dans un réseau mutualisé à deux ou trois maillons. A ce propos, le \mathcal{P} -

⁵⁰ Le gap (%) est défini comme [(la meilleure borne supérieure obtenue – l'objectif optimal de la PL)/l'objectif optimal de la PL]x100%

Median problème est aussi concerné pour localiser les hubs et affecter les nœuds. Le modèle créé est pour ainsi dire une combinaison du problème d'optimisation de transport avec une fonction linéaire par morceaux discontinus et du *P-Median* problème de la conception de réseaux logistique.

Le problème de tournées de véhicules notamment avec contrainte de capacité des véhicules a également été étudié. L'objectif de minimiser les émissions de CO₂ n'est pas encore bien étudié dans ce domaine et il n'existe pas une méthode exacte pour définir les tournées soumises à cet objectif d'émission. De plus, les résultats de (Palmer, 2007) et de (Ubeda et al., 2010) démontrent que la minimisation des distances parcourues offre des solutions comparables pour minimiser les émissions lors des tournées. Pour ces raisons, nous avons décidé d'adapter les modèles minimisant les distances afin d'approcher l'objectif d'émissions.

Il existe deux apports importants dans ce chapitre. Premièrement, nous avons construit un modèle qui vise l'objectif environnemental, précisément la minimisation des émissions de CO₂ du transport, lors de la conception de réseaux de distribution. Ce genre de modèle au niveau stratégique était encore absent dans la littérature avant ce travail. Donc, nous pouvons envisager que ce modèle d'aide à la décision pourrait être utile pour les chercheurs ou les praticiens logistiques spécialement dans le contexte du développement durable. Or, nous voudrions indiquer que ce modèle construit est générique pour concevoir un réseau de distribution. Il peut également être appliqué au niveau des coûts : minimiser le coût de transport. A la différence de la plupart de modèles concernant le coût de transport, ce modèle se fonde sur la fonction de coût discontinue du fait de la prise en compte de la capacité des véhicules. Donc le coût fixe de l'utilisation des véhicules est peut aussi être minimisé par le modèle comme étudié. Deuxièmement, à travers le modèle construit, nous pouvons maintenant tester les principes de la mutualisation. Avec les résultats de la modélisation des émissions de CO₂ du transport et des coûts logistiques, il sera possible d'évaluer quantitativement la performance des schémas logistiques après mutualisation et donc l'enjeu de la mutualisation. De ce fait, en se basant sur les résultats de ce chapitre, nous avons pu réaliser les études sur des cas réels qui seront présentées dans les deux chapitres qui suivent.

Il existe cependant des limites aux les résultats obtenus dans ce chapitre. L'optimisation est mono-objectif : les émissions de CO₂ ou le coût du transport à cette étape. Le modèle pourra être développé en plusieurs dimensions, par exemple environnement et économie. Ce genre de

modèle permet de déterminer les schémas logistiques qui représentent un compromis entre des émissions de CO₂ et un coût de transport par exemple. En outre, concevoir un réseau logistique durable est aujourd’hui plus compliqué. Il peut concerner plusieurs d’activités de transport comme les trajets à vides, les flux en retours (Bostel et al., 2005), etc. Ces aspects pourront être les critères d’optimisation dans le modèle. Cependant, nous pouvons envisager que ces développements du modèle apporteront des difficultés au niveau de sa réalisation en raison de sa complexité, notamment dû à la fonction discontinue. Une voie de simplification sera de passer à une fonction continue, concave, tout en contrôlant l’écart avec une fonction plus précise.

Enfin, la taxe carbone n'est pas introduite comme coût de transport dans cette étude. La principale raison est que, jusqu'à aujourd'hui, il existe encore des incertitudes importantes sur cette mesure politique concernant le transport de marchandises. Ce genre de coût pourra cependant être intégré dans le modèle d'optimisation au niveau de la fonction objectif. On aboutira alors à un modèle qui éclairera sur l'impact de la taxe sur les coûts, l'organisation du réseau et la réduction du niveau des émissions.

Chapitre 5. Potentiel de mutualisation entre les plus grands fournisseurs de la grande distribution en France

Dans le Chapitre 2, nous avons défini la mutualisation logistique et montré les propriétés de ce type d'organisation. Pour évaluer sa performance dans la logistique réelle, deux cas dans la grande distribution en France seront étudiés dans ce chapitre et le prochain. Il sera illustré les enjeux de la mutualisation, et plus particulièrement l'intérêt de ce genre d'organisation pour réduire les émissions de CO₂ de transport et d'en évaluer l'impact sur le coût logistique.

La première étude présentée dans ce chapitre s'appuie sur un projet de recherche réalisé en collaboration avec une association logistique importante en France : le Club Déméter pour la Logistique. Elle consiste à tester les principes de la mutualisation dans la grande distribution, à la fois pour deux enseignes et pour de grands fournisseurs communs. Sachant que ce genre de fournisseurs a déjà chacun des volumes importants, il sera intéressant d'étudier la mise en œuvre des principes de la mutualisation entre eux afin d'évaluer son potentiel.

L'intérêt de la mutualisation pour de grands fournisseurs se traduira par l'augmentation des fréquences de livraison et un mieux remplissage de moyen de transport, aussi le passage au transport multimodal, par exemple le cas rail-route étudié dans ce chapitre. Le dernier est particulièrement important au regard de l'objectif de minimiser les émissions de CO₂ du transport, car le mode ferroviaire est beaucoup moins polluant que la route en France. Cependant, cette organisation de transport amène un bilan économique défavorable avec le prix de transport actuel. De ce fait, nous avons également étudié l'impact de l'évaluation relative des coûts entre transport ferroviaire et routier sur le bilan des émissions de CO₂.

Dans la partie suivante, il est d'abord illustré le contexte et les objectifs de ce projet. Ensuite, nous allons présenter les données nécessaires à la mutualisation entre les fournisseurs et les deux enseignes pour modéliser et optimiser ce problème tel que présenté au Chapitre 4. Les résultats obtenus sont exploités au regard de deux critères : émissions et coût. Les différences entre ces deux critères ont également été étudiées.

5.1 Mutualiser des chaînes logistiques : quels acteurs et quels objectifs

5.1.1 Contexte du projet

Etudier une chaîne logistique et de surcroit tenter des rapprochements entre plusieurs n'est pas une démarche aisée car les acteurs sont multiples avec des intérêts divergents. Pour étudier ces réseaux de chaînes logistiques, aussi appelées Supply Web par Montreuil (Montreuil et al., 2009), il a donc été nécessaire de trouver un acteur qui les représente. En raison d'études antérieures menées par le laboratoire un contact a été établi avec un tel acteur. En effet, cette recherche a été menée en collaboration avec l'association Club Déméter pour la logistique⁵¹, association fondée par des acteurs de la logistique de la grande distribution en France. L'objectif de cette association est de « *promouvoir et de mettre en œuvre des actions concrètes, mesurables et respectueuses des 3 sphères économique, sociale et environnementale du Développement Durable* », ce qui est cohérent avec le but de cette thèse qui étudie le développement durable de la logistique.

De plus, les membres du club Déméter peuvent être des acteurs importants pour étudier et mettre en œuvre la mutualisation logistique. D'une part, les membres du club sont en général des entreprises qui soit gèrent des flux de marchandises importants, tels que des distributeurs comme Carrefour, Casino, etc., des industriels comme Danone, Procter & Gamble, Kraft Food, etc., soit sont leurs prestataires comme Geodis, FM Logistique, etc. Ce club regroupe donc des prescripteurs et des consommateurs importants des ressources logistiques telles que les moyens de transport, les entrepôts ou plateformes, etc. L'insuffisance des ressources logistiques, leur faible efficacité et les besoins économique et environnemental d'améliorer cette situation induisent un intérêt à étudier la mutualisation de ces réseaux logistiques. Par exemple, s'appuyant sur une étude sur les flux de plusieurs membres du Club Déméter, (Ballot et Fontane, 2010) ont montré que le taux de remplissage moyen des camions concernés est de l'ordre de 70% en surface. Bien que ce chiffre soit légèrement supérieur à ceux des études étrangères (McKinnon et al., 2003) et (Léonardi et Baumgartner, 2004), il est assez évident qu'il existe encore un potentiel d'amélioration important.

Tant du point de vue du développement durable, que du point de vu économique, les transports des grands fournisseurs du fait de leurs livraisons à fort volume, même s'ils

⁵¹ www.club-demeter.fr

saturent plus facilement les moyens de transport, présentent des enjeux forts. Par rapport aux PME, l'amélioration de l'activité de transport au sein des grands fournisseurs, notamment des produits de la grande consommation, pourraient amener une contribution globale éventuellement plus significative au niveau des émissions de CO₂ et plus facile à mettre en œuvre car concernant moins d'acteurs. C'est pourquoi, la mutualisation proposée a retenu l'attention de membres du club Déméter et ils ont trouvé un intérêt à réaliser une étude de valorisation des enjeux de la mise en place de la mutualisation entre certain d'entre eux.

C'est dans ce contexte que la collaboration avec le club Déméter est créée. À travers un projet de recherche, cette collaboration nous permet d'avoir une base de données réelle concernant les flux, les sites d'origines et de destinations, dans un horizon de temps de grands acteurs logistiques du Club. Ces données réelles sont très importantes pour cette étude, car elles donneront un enjeu réaliste de la mutualisation des flux avec les ressources existantes.

5.1.2 Objectifs scientifiques et du cas

D'un point de vue scientifique, l'objectif de cette étude est d'évaluer la performance en émissions de schémas logistiques avant et après mutualisation puis l'impact sur la performance économique à travers le coût de transport. De plus, sachant que les fournisseurs retenus ont des flux importants, la mutualisation pourrait générer un report modal vers le transport ferroviaire, en dépassant la contrainte de volume d'expédition liée ce genre de moyen (train complet ou demi train complet). Nous étudions donc cette possibilité et l'impact de ce rapport modal avec la structure des émissions et des coûts actuelle en France, ainsi que les différences entre les solutions qui minimisent les émissions et celles qui minimisent le coût. Cette étude construira donc les modèles d'aide à la décision qui permettront aux acteurs qui le désirent de poursuivre dans cette voie.

La revue de la littérature montre d'ailleurs qu'il n'y a pas encore des modèles d'optimisation dans le but de concevoir un réseau logistique de distribution en minimisant les émissions de CO₂ du transport pour les décideurs en logistique. Particulièrement, la prise en compte de transport conjoint, routier et ferroviaire ici, est une tendance recherchée par la grande distribution nationale. De sorte de combler cette lacune, les modèles construits à travers cette étude apportent un support de décision pour les praticiens logistiques, par exemple sur la conception de réseau et le choix de mode de transport selon les critères

environnementaux et économiques. Donc l'application des résultats de cette étude est envisageable dans l'industrie à court ou moyen terme.

5.1.3 Périmètre et méthodologie

La problématique de la distribution des produits de grande consommation, revient à la **conception de réseau de distribution (DNDP, Distribution Network Design Probleme)** (Ambrosino et Grazia Scutella, 2005) tel qu'étudié au Chapitre 4. Le principe de cette conception est de mutualiser les réseaux indépendants au niveau du transport et des infrastructures telles que les plateformes. La base de données du Club Déméter nous permet d'étudier cette possibilité à partir de la connaissance des flux et des réseaux actuels.

La méthodologie proposée dans cette étude de cas peut se reporter à la Figure 5.1 :

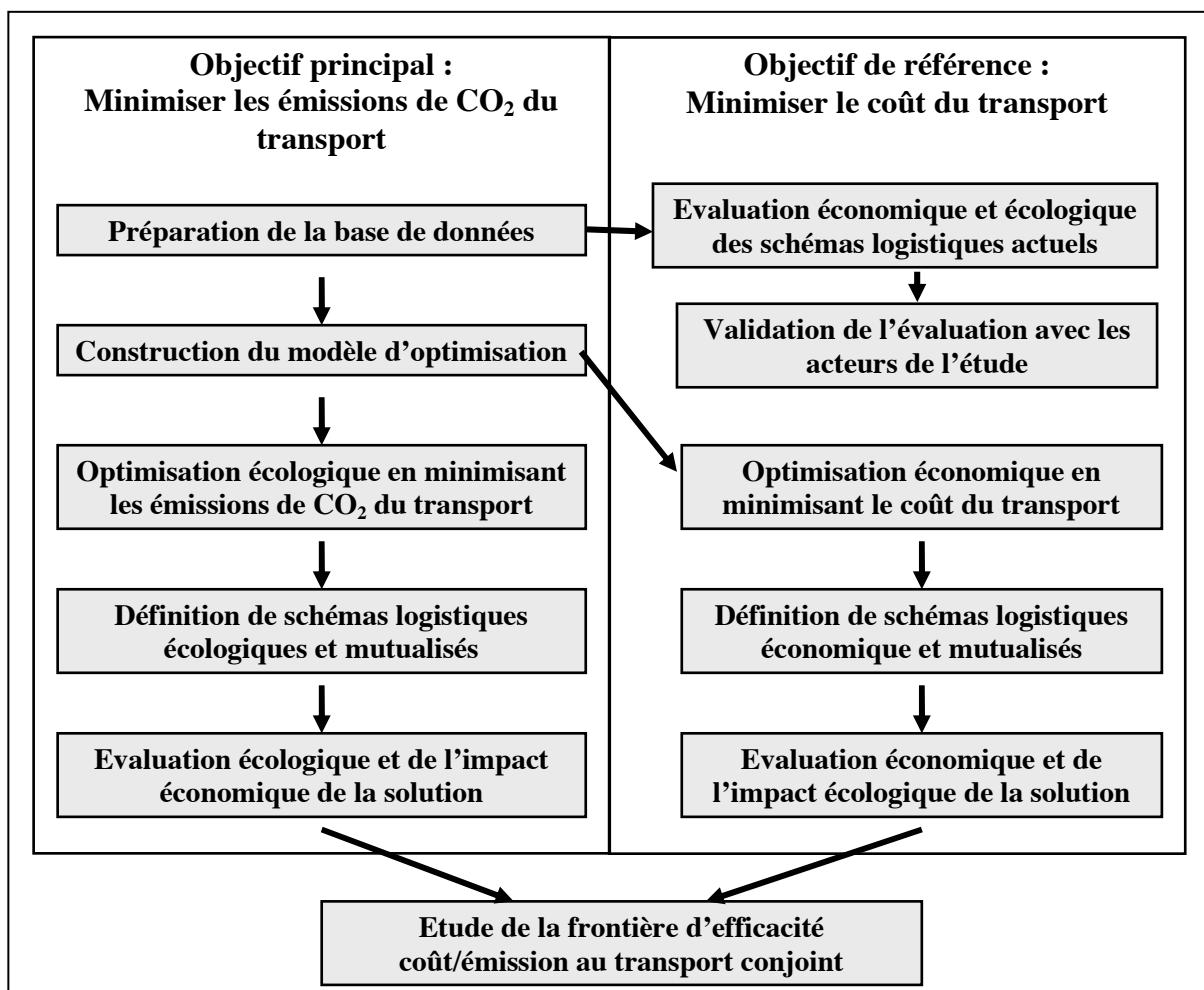


Figure 5.1 : Méthodologique de l'étude

Le périmètre de l'étude est défini comme : **les réseaux de distribution entre les sites des fournisseurs (usines ou entrepôts) et les plateformes régionales des distributeurs.** Autrement dit, les PDV (Points de Vente) des distributeurs ne sont pas concernés dans cette étude. Ce périmètre a été décidé du fait que, d'une part, le transport du segment aval de la chaîne (plateforme-PDV) est généralement à courte distance, et, au contraire, la distance du transport entre entrepôt fournisseur et plateforme distributeur est plus importante au regard des émissions ; d'autre part, le segment aval est très complexe en raison d'un grand nombre de PDV et de leur répartition au niveau national, il serait donc difficile de prendre en considération cette partie des schémas logistiques dans le modèle d'optimisation. Ainsi, le périmètre des sites des fournisseurs (usines ou entrepôt) aux plateformes des distributeurs est retenu dans cette étude.

Après la préparation des données et la construction du modèle d'optimisation, il est possible de résoudre les problèmes par les deux approches, minimisation des émissions de CO₂ du transport et minimisation du coût du transport. Enfin, une étude complémentaire sur la communication sur les différences entre émissions et coût du transport est réalisée pour démontrer l'impact des coûts des transports sur les émissions de CO₂.

Dans les paragraphes suivants, il est montré comment les principes de la mutualisation sont mis en place sur les réseaux logistiques de la base de données, et quels sont les résultats obtenus.

5.2 Construction de la base de données des réseaux de distribution et réduction de la taille du problème

5.2.1 Construction de la base de données des 100 premiers fournisseurs communs de deux enseignes de la grande distribution

La base de données originale a été élaborée en collaboration avec deux enseignes et des membres du Club Déméter. Elle concerne les flux de marchandises sur les premières 20 semaines de l'année 2006 de deux grandes enseignes françaises et les 200 premiers fournisseurs en volume de chacune. Ce choix garantit l'importance des enjeux car ces flux couvrent environ 90% des flux de l'Hexagone des deux enseignes (hors les Marques de Distributeurs) pour les produits alimentaires concernés. Cette base comprend de plus les coordonnées géographiques des sites des fournisseurs (entrepôts ou usines) et les plateformes

des distributeurs destinataires de ces flux. Les flux de cette base de données sont mesurés en nombre de palettes (équivalent palette complète).

Ensuite nous avons construit une base de données unifiée pour cette étude. La base comporte finalement des données de distribution des deux chaînes logistiques des distributeurs et de leurs 106 fournisseurs communs les plus importants sur 12 semaines retenues. Il s'agit de 164 sites sources appartenant aux 106 fournisseurs et qui livrent les 48 plateformes des distributeurs, donc les possibles schémas actuels $164 \times 48 = 7872$. Trois types de familles de produits sont choisis dans cette base : DPH (droguerie, parfumerie et hygiène), épicerie et liquides. Ce choix est identifié en raison de leurs comportements différents et de leur pertinence : relativement moins d'industriels se concentrent sur les DPH, le fort volume des épiceries et le poids des produits liquides (Ballot et Fontane, 2010). Les caractéristiques des flux sont illustrées dans le Tableau 5.1 selon les familles de produits (Voir Annexe 3).

Familles de produits	Distance moyenne /destination (km)	Ecart type de distance /destination	Flux moyens /semaine (pal)	Ecart type des flux /semaine	Flux moyens /semaine /destination (pal)
DPH	377	210	25,765	3,225	21.08
Epicerie	368	212	61,544	7,446	14.20
Liquides	393	214	66,248	4,183	28.38

Tableau 5.1 : Caractéristiques des flux de base de données étudiée

Le Tableau 5.1 illustre que les flux hebdomadaires d'entrepôt/usine par plateforme sont fragmentés en petits volumes par semaine. Au regard de l'écart type de flux par semaine, on peut constater une variabilité en raison de l'effet saisonnier, de la politique de réapprovisionnement et des offres commerciales (Ballot et Fontane, 2010). Par rapport aux familles, les produits de DPH concernent moins de flux moyens par semaine mais ils représentent un volume aussi important au niveau de flux moyens par semaine et par destination.

5.2.2 Taille du problème et hypothèses de sa réduction

La taille de ce problème est grande avec le nombre de variables d'environ 10^7 . Mathématiquement, ce problème de type NP-difficile est donc extrêmement difficile à résoudre avec une précision suffisante. Nous avons donc été obligés de chercher des solutions

qui permettent de le simplifier. A ce sujet, O'kelly et Miller présentent trois approches (O'Kelly et Miller, 1994).

La première approche consiste à simplifier les variables de décision, par exemple en faisant l'hypothèse commune que le coût de transport est indépendant du volume de transport (Campbell, 1990). Mais (O'Kelly et Bryan, 1998) indiquent que cette hypothèse ne prend pas en compte l'effet de l'économie d'échelle au transport et qu'elle induit donc éventuellement de résultats incorrects. L'objet d'optimisation de ce travail étant les émissions de CO₂ du transport qui dépendent fortement le volume de frets transportés, cette approche est peu pertinente dans cette étude.

Deuxième approche, en reconnaissant les difficultés mathématiques du problème, on peut appliquer **les algorithmes heuristiques pour chercher des solutions locales plutôt que de la solution optimum globale du problème**, par exemple la méthode Recuit Simulé (Syam, 2002), le Tabou (Tuzun et Burke, 1999), ou encore la relaxation Lagrangienne (Pirkul et Schilling, 1998). Il est prouvé que ces démarches sont utiles vis-à-vis des problèmes à grande échelle notamment d'optimisation NP-Difficile. En général, les modèles heuristiques sont souvent conçus en visant les problèmes particuliers et ne sont pas génériques pour les autres problèmes. Mais dans cette thèse, nous cherchons à construire un modèle générique d'aide à la décision pour la conception de réseau mutualisé de la grande distribution. En conséquence, cette approche n'a pas été retenue.

La troisième approche concerne **la décomposition du problème original**, par exemple étudier les sous-réseaux au lieu de traiter le réseau global. Cette approche est adaptée à ce travail du fait qu'elle nous permet des solutions ayant la bonne qualité d'optimisation et des modèles génériques pour résoudre les problèmes de même type. En outre, les démarches de décomposition présentées ensuite correspondent à des contraintes logistiques des fournisseurs de l'étude. Donc les critères de décomposition sont pour ainsi dire les bornes inhérentes aux flux concernés.

Etant donné la taille du problème, la base de données a été décomposée suivant deux principes : la famille de produit et le volume de fournisseur.

5.2.2.1 Décomposition par famille de produit

Premièrement, les flux dans la base de données sont décomposés en trois **familles de produit traitées : DPH (droguerie, parfumerie et hygiène), EP (épicerie) et LIQ (liquides)**. Cette division est fondée sur le fait que ces familles de produits n'ont pas le même comportement logistique et sont souvent non mélangées au niveau de la chaîne logistique, par exemple, un entrepôt de liquide n'est pas conçu pour traiter les produits de la parfumerie. Il y a en outre des incompatibilités entre produits à respecter (odeur, risque santé, incendie, etc.). Cette division en famille sera conservée pour s'appuyer sur les réseaux et pratiques actuelles même si elle est restrictive et que l'on peut imaginer de la remettre en cause dans le futur.

En respectant strictement ce critère, les flux qui sont de différentes familles seront traités individuellement même s'ils partent du même site d'un fournisseur. Par exemple, les produits de la famille d'épicerie et ceux de liquides ne sont pas livrés dans le même camion, même s'ils ont dans le même site de départ. C'est aussi la raison pour laquelle la somme des sites distribués dans le Tableau 5.2 est légèrement supérieure à la totalité des sites de distributeurs citée au-dessus. Ce cas est néanmoins rare.

Les flux dans la base étant mesurés en palette, est les trois familles de produits n'ayant pas la même densité en poids par palette, il est fait l'hypothèse que **les familles EPH et EP correspondent aux produits légers (saturation en volume) et que la famille LIQ correspond aux produits lourds (saturation en poids)**. Cette hypothèse correspond aux critères de la mise en place pour la modélisation des émissions de CO₂ étudiée dans le Chapitre 4 qui montre que les émissions (CO₂/palette-km) ne sont pas identiques pour les produits légers ou lourds avec une différence de l'ordre de 30% en émissions par palette en camion.

5.2.2.2 Décomposition par classes de volume expédié

Deuxièmement, les fournisseurs dans chaque famille sont de plus divisés en trois groupes en fonction de **l'importance des flux de leurs produits**. En effet, une première étude de cas sur ces mêmes données a montré qu'il n'était pas envisageable de mélanger des volumétries trop différentes, voir (Ballot et Fontane, 2008a) et (Ballot et Fontane, 2010). Etant donné les contraintes sur l'organisation des plateformes logistiques et du transport, il est peu courant de transporter ensemble des flux à très forte rotation et d'autre à faible rotation. Ce principe se retrouve d'ailleurs dans la stratégie des distributeurs avec des plateformes «faible rotation».

En équilibrant le nombre de fournisseurs dans chaque groupe, les bornes volumiques des groupes sont 0-200, 200-600 et >600 palettes par semaine et fondée sur une moyenne des flux sur les 12 semaines en sortie des fournisseurs. Cette division empirique est basée sur la complexité des sous-problèmes afin que chaque sous-problème. Il s'agit néanmoins d'une sous optimisation.

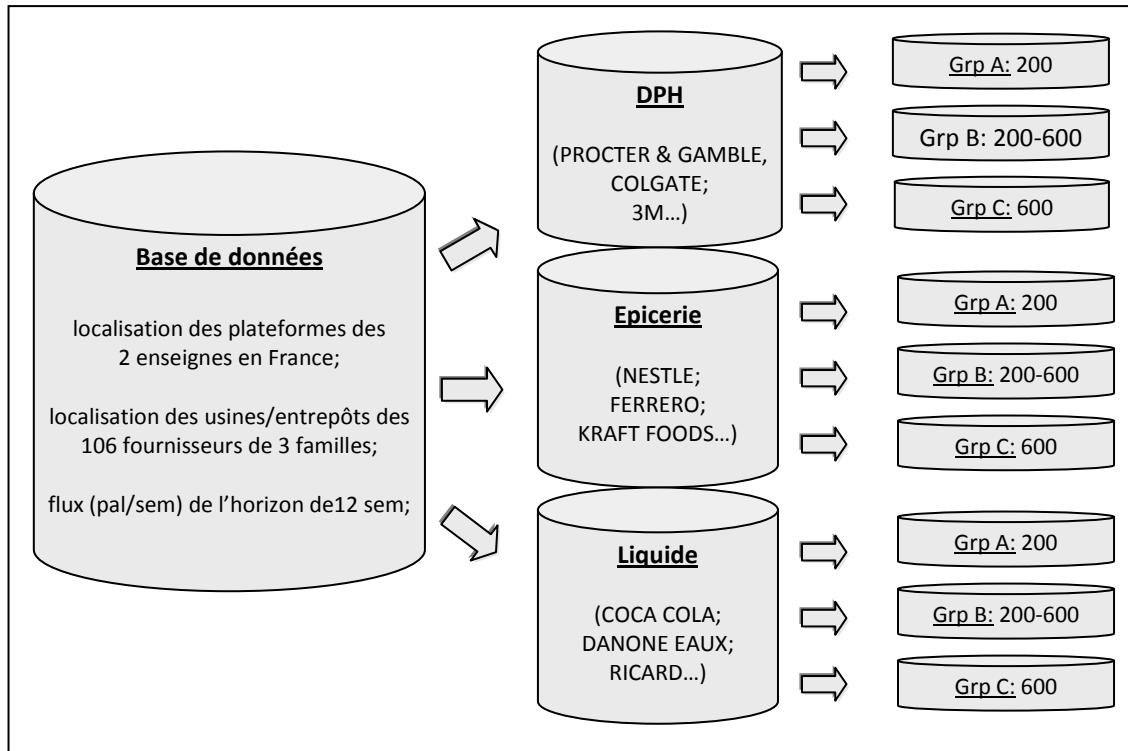


Figure 5.2 : Décomposition de la base de données et exemples de fournisseurs des familles

En conséquence, le problème est décomposé en 9 sous-problèmes, voir la Figure 5.2, et le nombre de fournisseurs dans chaque sous-problème est présenté dans le Tableau 5.2, aspect qui réduit la taille des problèmes d'optimisation.

Familles/Groupes des produits	DPH	EP	LIQ
Groupe A (pal/sem<200)	8	25	21
Groupe B (200≤pal/sem≤600)	9	29	25
Groupe C (pal/sem>600)	13	27	34

Tableau 5.2 : Nombre de fournisseurs dans les groupes des familles de produit

5.3 Mise en place du modèle de réseaux logistiques mutualisés entre des fournisseurs de la grande distribution

Deux caractéristiques de cette étude sont à identifier. D'abord, sachant que ce cas correspond au transport des flux à fort volume au niveau national, la stratégie de la tournée de

véhicule n'est pas considérée comme une opération de transport pertinente à tester. Autrement dit, les flux seront livrés soit directement Origine-Destination, soit par des hubs de mutualisation. Deuxièmement, la base de données du Club Déméter concerne deux grands distributeurs et cela permet également d'étudier la mutualisation en aval entre distributeurs. En conséquence, la mutualisation est étudiée par le scénario suivant.

5.3.1 Principes de modélisation pour la mutualisation

La base de données permet d'étudier l'apport d'une mutualisation des flux depuis les entrepôts ou les usines des fournisseurs (notés WH) vers les centres de distribution (notés DC). Afin de mutualiser les moyens (WH ou DC) et donc leurs flux, trois critères sont appliqués :

(1) en faisant l'hypothèse que la densité des lieux logistiques actuelle est importante et optimisée, leur localisation permet de trouver la solution parmi les lieux actuels. **Les lieux de mutualisation en amont (hub amont) et en aval (hub aval) ont été choisis parmi les WH et les DC existants.** Par exemple les sites du fournisseur i et du distributeur n dans la Figure 5.3. Autrement dit, la mise en place de la mutualisation ne se fonde pas sur la création de nouveaux sites logistiques. Ce critère s'accorde avec l'esprit de la mutualisation et les moyens nécessaires à sa mise en œuvre qui consiste à mieux l'utiliser les ressources existantes.

(2) **le réseau mutualisé n'exclut pas des trajets directs, tels que réalisés actuellement, et donc n'implique pas nécessairement de rupture de flux supplémentaire.** C'est-à-dire qu'il existe quatre chemins possibles pour les flux partant de chaque site source et chaque destination : WH-DC direct, WH-hub amont-DC, WH-hub amont-hub aval-DC ou WH hub aval-DC. Par exemple le flux du site k au l est livré directement en raison de son volume et de la distance de regroupement, voir la Figure 5.3. Les chemins de transport sont définis par le modèle d'optimisation. **Ce critère permet une mutualisation que lorsque celle-ci est pertinente et non systématiquement.**

(3) **au niveau de l'interconnexion des sites, un site fournisseur ne livre qu'un hub amont et un centre de distribution n'est servi par qu'un hub aval identique dans l'horizon de temps.** En effet, les flux pourraient se disperser largement dans le réseau et cela apporterait une difficulté dans la gestion des flux sur les sites. Donc, ce principe a pour l'objectif de rendre possible la gestion de flux et des stocks sur les sites dans le contexte

actuel. Par contre, cela peut être considéré comme une contrainte non liée à la mutualisation mais imposée par l'organisation logistique actuelle, notamment les systèmes d'informations.

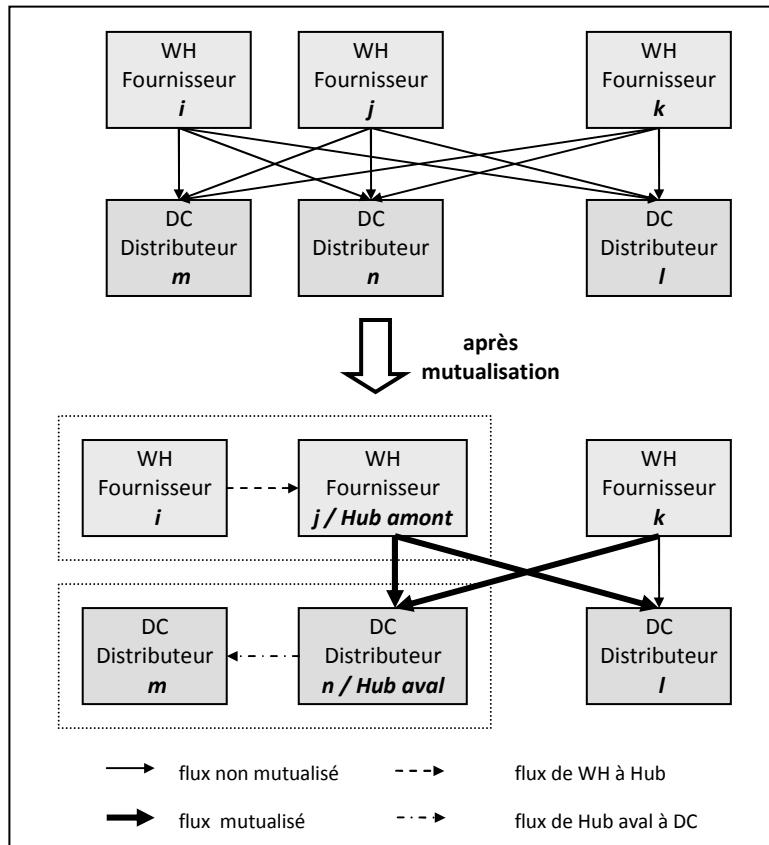


Figure 5.3 : Exemple du réseau mutualisé entre les fournisseurs à fort volume au niveau national

En conséquence, la mutualisation de ces réseaux de distribution est représentée par un réseau à trois échelons : le flux en amont du fournisseur (WH) au centre de regroupement amont (hub amont) ; le flux intermédiaire du hub amont au centre de regroupement de distribution (hub aval), puis du hub aval au centre de distribution de l'enseigne (DC), voir la Figure 5.3. La forme du réseau mutualisé correspond aux choix présentés ci-dessus : tous les hubs sont complètement interconnectés ; tous les nœuds non-hub sont connectés à un seul hub ; et la connexion des nœuds non-hubs est autorisée. De ce fait, il est comparable avec le Protocole C présenté originellement dans l'article (O'Kelly et Miller, 1994).

5.3.2 Modélisation

Selon ces principes, le problème de conception et de type DNDP et peut être décrit comme la définition un graphe $G=(N,A)$, où l'ensemble de nœuds $N=O \cup M \cup N \cup D$ (O : sites des fournisseurs ; M et N : candidats de hubs amont et aval ; D : plateformes des distributeurs), et l'ensemble d'arcs $A=O \times M \cup M \times N \cup N \times D$. L'objectif de l'optimisation est de minimiser les

émissions de CO₂ au transport sans dégrader le service aux distributeurs qui est représenté par la fréquence de livraison hebdomadaire dans la base de données.

5.3.2.1 Modèles

En raison de la complexité du problème, le modèle d'optimisation vise un flux de mono-période en flux par semaine fondé sur une moyenne des flux sur 12 semaines des fournisseurs. Il est illustré dans le Tableau 5.1 que les flux par semaine sont relativement stables sur les 12 semaines pour les familles de produits. De plus, si l'on regarde les flux par semaine et par liaison origine-destination, la situation est identique pour la plupart de cas (il s'agit des milliers de liaisons dans la base, il est donc difficile de montrer tous les cas). C'est la raison pour laquelle le modèle présenté ci-après correspond à une période et non à 12 semaines. Sur certains cas le modèle a cependant été testé sur les 12 semaines et les résultats comparés en flux moyens. Il a été constaté une stabilité de la solution. Voici donc le modèle d'optimisation commun pour les sous-problèmes :

$$\min : \sum_{om \in A_u} d_{om} \varepsilon(x_{om}) + \sum_{mn \in A_m} d_{mn} \varepsilon(x_{mn}) + \sum_{nd \in A_d} d_{nd} \varepsilon(x_{nd}) \quad 5.1$$

$$\text{Avec : } \varepsilon(x_a) = f_a^s y_a^s + v_a^s z_a^s \quad 5.2$$

Contraintes de linéaire par morceaux :

$$x_a = \sum_{s \in S_a} z_a^s ; \quad a \in A \quad 5.3$$

$$x_a = \sum_{k \in K} x_a^k ; \quad a \in A \quad 5.4$$

$$lb_a^s y_a^s \leq z_a^s \leq ub_a^s y_a^s ; \quad a \in A, s \in S_a \quad 5.5$$

$$\sum_{s \in S_a} y_a^s \leq 1 ; \quad a \in A \quad 5.6$$

$$y_a^s \in \{0,1\} ; \quad a \in A, s \in S_a \quad 5.7$$

$$z_a^k \geq 0 ; \quad a \in A, k \in K \quad 5.8$$

Contraintes d'équilibre des flux :

$$x_a^k \geq 0 ; \quad a \in A, k \in K \quad 5.9$$

$$\sum_{m \in M} x_{om}^k = R_o^k ; \quad o \in O, k \in K \quad 5.10$$

$$\sum_{n \in N} x_{nd}^k = B_d^k ; \quad d \in D, k \in K \quad 5.11$$

$$\sum_{o \in O} x_{om}^k = \sum_{n \in N} x_{mn}^k ; \quad m \in M, k \in K \quad 5.12$$

$$\sum_{m \in M} x_{mn}^k = \sum_{d \in D} x_{nd}^k ; \quad m \in M, k \in K \quad 5.13$$

Contraintes d'affectation des hubs :

$$p_{om}^k \in \{0,1\}; o \in O, m \in M, k \in K \quad 5.14$$

$$x_{om}^k \leq p_{om}^k \cdot Z; o \in O, m \in M, k \in K \quad 5.15$$

$$\sum_{m \in M} p_{om}^k = 1; o \in O, k \in K \quad 5.16$$

$$q_{nd} \in \{0,1\}; d \in D, n \in N \quad 5.17$$

$$x_{nd}^k \leq p_{om}^k \cdot Z; o \in O, m \in M, k \in K \quad 5.18$$

$$\sum_{n \in N} q_{nd} = 1; d \in D \quad 5.19$$

Notations :

Z : une constante grande ;

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

O, M, N, D : l'ensemble des sites des fournisseurs (O), les WH en tant que hubs candidats amont (M), les PF en tant que hubs candidats aval (N) et les destinations (D) ;

A_u, A_m, A_d : sous-ensembles de l'ensemble des arcs A avec A_u l'ensemble des arcs amonts, A_m intermédiaires et A_d avals;

a : arc élément des sous-ensembles présentés ci-dessus $a \in A$;

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

$\varepsilon(x)$: fonction linéaire par morceaux représentant l'émission de CO₂ du flux x ;

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

B^k_d : quantité du produit k demandé au PDV $d \in D$;

S_a : représente le nombre de segment sur l'arc a ;

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

z^s_a : charge du segment s sur l'arc a ;

x_a : flux total sur l'arc a ;

f^s_a : valeur fixée et non négative de l'intersection du segment s sur l'arc a . Au niveau de la fonction d'émissions, elle égale les émissions de CO₂ d'un moyen de transport parcouru à vide. Sachant que les segments sont parallèles et identiquement décalés pour le même moyen de transport, par exemple pour le camion avec $E_{vide}=0,772$ kg/km, on a $f^l_a=0,772$, $f^2_a=1,544, \dots$ et $f^s_a=0,772*s$, de même pour le train. En plus, ces intersections sont identiques pour tous les arcs, voir la partie de la modélisation des émissions au chapitre 4 ;

v^s_a : pente du segment s sur l'arc a . Les segments sont parallèles avec $v^s_a=0,00982$ pour les produits de DPH et d'épicerie et $v^s_a=0,0141$ pour les liquides en transport routier. Quant au transport ferroviaire, ce sont de 0,00099 pour les DPH et épicerie, et de 0,0014 pour les liquides, voir la partie de la modélisation des émissions au chapitre 4 ;

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

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

Variables de décision :

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

p^k_{om} : variable binaire avec $p^k_{om}=1$ si le flux du produit k passe par l'arc $om \in A_u$, sinon 0;

q_{nd} : variable binaire avec $q_{nd}=1$ si la destination d est servi par le hub aval n , sinon 0;

La fonction d'objectif (5.1) minimise la somme des émissions de CO₂ liées aux transports des trois échelons. Les contraintes se présentent en trois groupes. La formule (5.2) et les contraintes (5.3)-(5.8) s'appuyant sur le *Multiple Choix Model* dans le travail (Croxton et al., 2003a) ont pour but de modéliser la fonction d'émissions linéaire par morceaux et assurent que le flux total des produits sur un arc se situe sur un et au plus un segment. Avec les

contraintes (5.9)-(5.13), la quantité de produit dans chaque maillon de la chaîne logistique est conservée et satisfait à la demande finale. Les six dernières contraintes (5.14)-(5.19) représentent l'hypothèse qu'il existe au plus un hub amont pour un fournisseur et un centre de distribution est servi par au plus un hub aval.

Le modèle ci-dessus a été partiellement discuté dans la partie concernant la création de modèle au Chapitre 4. Certaines modifications sont faites en fonction des spécificités de cette étude. De plus, lors de la mise en compétition des deux modes de transport, la fonction objectif et les variables de flux sont dédoublées. Une contrainte minimale sur la taille des envois ferroviaires est ajoutée, car le transport ferroviaire est contraint en taille d'envoi.

5.3.2.2 Résolution du problème d'optimisation

Ce problème est de type NP-difficile (Ahuja et al., 1993) et le nombre de variable atteint 23000 variables dans certains des cas présentés. Afin de le résoudre, nous faisons certaines hypothèses pour améliorer la convergence :

a. La fonction d'émission est linéaire par morceaux, et est non convexe. Le nombre de segments (à savoir les variables entières) dépend alors de la taille du flux. Or il a été démontré par des travaux sur l'efficacité de la fonction linéaire par morceaux (Marins et al., 1997), (Croxton et al., 2007) et (Kameshwaran et Narahari, 2007), que la continuité, le nombre de segment et la convexité influent d'une manière remarquable sur le temps de calcul. Cela nous conduit à simplifier la fonction avec l'hypothèse que **le camion sera toujours complet au-delà d'un volume représentant un équivalent de 5 camions par semaine**, ainsi le nombre de segment dans le cas de moyen de camion est de dimension maximale 6, $S_a=6$ et $s \leq 6$, voir la Figure 5.4 ; de même que l'intersection du segment 6 est $f_a^6=0$ la pente du segment est $v_a^6=0,3321$ pour les familles DPH et épicerie et $v_a^6=0,476$ pour les liquides, lorsque $x_a \geq ub^5_a$. Il s'agit donc une démarche d'approximation. D'une manière similaire pour le moyen ferroviaire, considérant la capacité importante d'un train et son faible niveau d'émissions de CO₂, la fonction est réduite à deux segments représentant l'émission du premier train puis celle des trains toujours complets, car il est possible de faire varier la taille des trains au delà du demi-train complet.

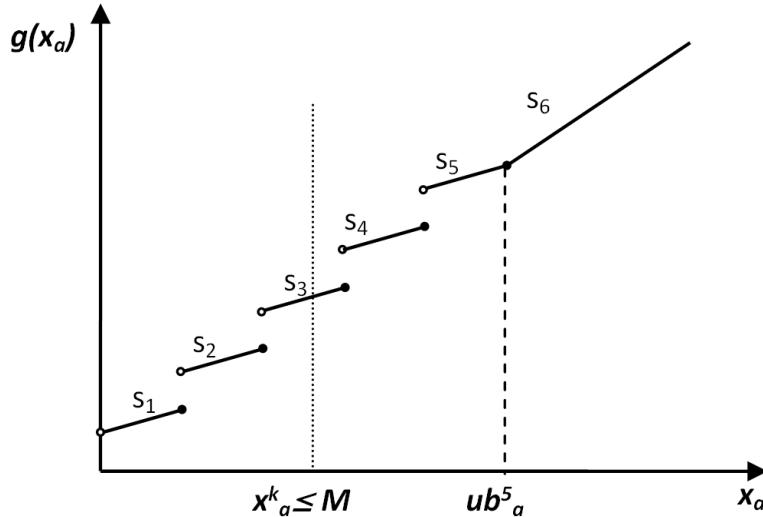


Figure 5.4 : Illustration de la simplification des segments de la fonction linéaire discontinue et des coupes supplémentaires sur la taille de flux sur l'arc (transport routier)

b. Comme nous sommes en capacité de borner les flux sur chaque relation, nous pouvons donc limiter le nombre de variables binaires sur chaque flux par des coupes supplémentaires en se référant au travail (Croxton et al., 2003b).

c. Au niveau du rayon de sélection pour le regroupement : sachant que les hubs amont et aval sont respectivement dans l'ensemble des WH et des DC, il a été fait l'hypothèse que le point de mutualisation entre fournisseurs ou entre distributeurs ne pourrait pas se trouver à plus d'une certaine distance du point source du flux afin encore une fois de limiter le nombre de variables. Par contre pour éviter une sous optimisation, la distance de 100 km est prise après une étude du temps de la résolution et de la qualité de la solution en fonction du rayon de regroupement. Celle-ci est à comparer au trajet direct moyen de l'ordre de 350km. Cette démarche permet de réduire environ 90% de variables dans chaque problème, voir le Tableau 5.3, ainsi de diminuer considérablement le temps de calcul. En effet, il est possible que cette contrainte du rayon de regroupement exclue éventuellement des possibilités de mutualisation. Mais le rayon de 100 km représente la plupart des regroupements réalisables.

	DPH		EP		LIQ	
	avant	après	avant	après	avant	après
Groupe pal<200	12386	1601	36577	3448	51183	5474
Groupe pal=200-600	11601	1832	59839	5255	65481	5233
Groupe pal>600	21776	3023	52912	7035	100295	10002

Tableau 5.3 : Nombre de variables du transport routier (avant et après application du rayon de regroupement)

Avec le modèle d'optimisation et les hypothèses de réduction du nombre des variables, le problème présenté a pu être résolu. Les résultats relatifs à la diminution des émissions de CO₂ sont présentés dans le paragraphe suivant.

5.4 Résultats et discussions

Les résultats proviennent d'une machine Quad CPU Q6700 (2.66 GHz et 4 GB RAM). Le problème de transport est modélisé dans le logiciel OPL 6.0 d'ILOG et est résolu via le moteur d'optimisation CPLEX 12.1. Tous les résultats présentés ont été obtenus avec un écart inférieur à 3% entre la borne inférieure et la solution.

Nous rappelons que les fournisseurs ont été segmentés en trois groupes : GroupeA<200 palettes/semaine, 200≤GroupeB≤200-600 palettes/semaine et GroupeC>600 palettes/semaine. De même, les valeurs des émissions dans les tableaux de résultats présentés ci-après sont mesurées en tonne et trois termes des émissions sont élaborés :

Emissions minimales : c'est la borne inférieure des émissions. Au delà de la résolution du problème d'optimisation présenté, il peut être intéressant de calculer une borne inférieure des émissions représentée par des trajets directs entre source et destination en faisant l'hypothèse d'une saturation du moyen de transport. Le programme d'optimisation (5.1) précédent est alors remplacé par une optimisation avec une fonction objectif linéaire d'émission ;

Emissions actuelles : c'est la référence des émissions qui est calculée avec l'hypothèse que les flux non mutualisés sont transportés séparément et directement des sites fournisseurs aux sites distributeurs. Il ne s'agit pas d'optimisation mais de l'évaluation de la performance des schémas logistiques actuels à partir de la base de données. Cette hypothèse est validée en accord des partenaires de l'étude, puisque pour ce genre de grands fournisseurs leurs schémas logistiques sont pour ainsi dire indépendants l'un l'autre, les kilomètre parcourus, ainsi que les taux de remplissage ont été validés avec les acteurs ;

Emissions des chemins mutualisés : C'est la somme des émissions du réseau mutualisé à 3 maillons défini par le modèle d'optimisation.

5.4.1 Transport routier

Dans un premier temps, le transport routier est le seul moyen de transport pris en compte. L'objectif est d'évaluer la performance de la mutualisation des schémas logistiques en termes de réduction des émissions de CO₂ sur les 9 sous problèmes mentionnés en les comparant aux émissions actuelles des camions. Ainsi, dans le Tableau 5.4 de résultats nous mentionnons les trois termes d'émissions présentés ci-dessus : Emissions actuelles, Emissions/mutualisation et enfin Emissions minimales. De plus, les résultats sont présentés selon les familles de produits et les sous-groupes des familles, ainsi que la somme pour chaque famille.

Groupes des fournisseurs	A	B	C	Σ
DPH				
Emissions actuelles	51	93	319	463
Emissions / mutualisation	28	62	290	380
Diminution	Absolue	23	31	83
	Relative	45%	33%	9%
				18%
Emissions minimales	11	45	266	322
Diminution	Absolue	40	48	53
	Relative	78%	52%	17%
				141
				30%
EP				
Emissions actuelles	132	309	670	1111
Emissions / mutualisation	67	219	628	916
Diminution	Absolue	65	90	42
	Relative	49%	29%	6%
				18%
Emissions minimales	29	147	568	744
Diminution	Absolue	103	162	102
	Relative	78%	52%	15%
				736
				33%
LIQ				
Emissions actuelles	183	291	1257	1731
Emissions / mutualisation	93	255	1193	1541
Diminution	Absolue	90	36	64
	Relative	49%	12%	5%
				11%
Emissions minimales	39	177	1134	1350
Diminution	Absolue	144	114	123
	Relative	79%	39%	10%
				381
				22%
TOTAL				
Emissions actuelles	366	693	2246	3305
Emissions / mutualisation	188	536	2111	2835
Diminution	Absolue	178	157	135
	Relative	49%	23%	6%
				14%
Emissions minimales	79	369	1968	2416
Diminution	Absolue	287	324	278
	Relative	78%	47%	12%
				889
				27%

Tableau 5.4 : Emissions de transport routier en une semaine (tonne CO₂)

Ces résultats montrent que la mise en œuvre d'une mutualisation des schémas logistiques conduit à une diminution significative des émissions. Nous pouvons conclure que cette

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

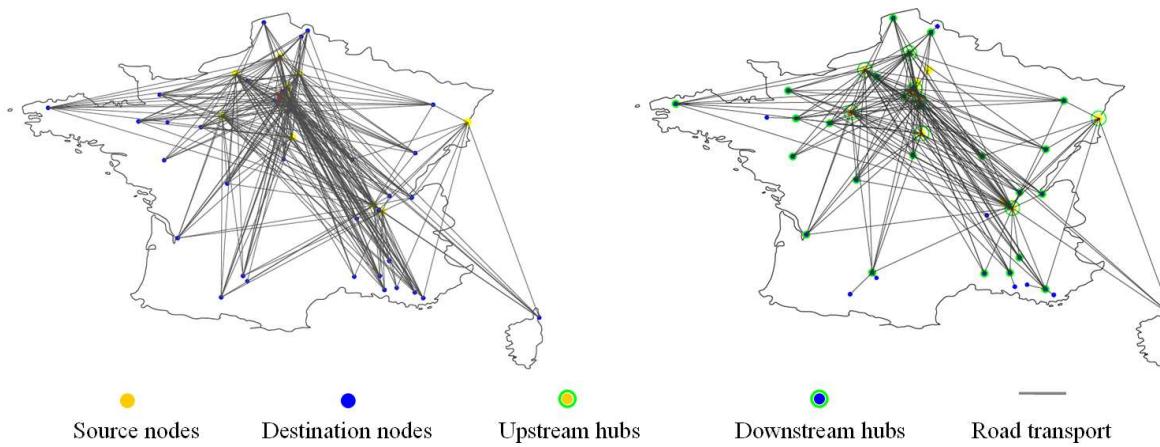


Figure 5.5 : Exemple du réseau de transport routier avant et après mutualisation (Groupe C de DPH)

Outre la réduction des émissions de CO₂, la Figure 5.5 illustre qu'en corollaire le nombre de schémas de transport diminue en raison de la mise en commun du réseau. Cette figure illustre simplement l'exemple du cas du Groupe C des produits de DPH, on peut se référer à l'Annexe 1 pour toutes les cartes des flux avant et après mutualisation.

En raison de la mutualisation, les flux d'origine ou de destination proches sont livrés par le même schéma logistique. Ainsi, la totalité du nombre de livraisons est réduite mais la fréquence de livraison est conservée ou améliorée. Cela peut être vu comme un autre avantage important de la mutualisation. Comme le montre le Tableau 5.5, le taux de chargement, le nombre de kilomètres et la fréquence de livraison sont tous améliorés après la mutualisation. Par rapport aux groupes, on peut constater que les résultats sont identiques avec la réduction d'émissions : le gain de taux de chargement et des kilométrages des Groups C est relativement moins remarquable. Or, l'amélioration sur l'augmentation des fréquences de livraison (par semaine) dans ces groupes à fort volume est intéressante : entre +67% et +110%. En outre, il faut expliquer que le taux de chargement est la valeur pondérée par le volume livré, puisqu'il s'agit d'une estimation plus précise au regard de l'importance de flux à fort volume. De plus, la

fréquence de livraison est comparée entre les schémas actuels et les schémas inters (hub-hub) après la mutualisation, car ces schémas qui concernent la livraison entre fournisseurs et distributeurs sont de fait plus comparables.

Fournisseurs / GRP		A			B			C		
		Taux moy	Km	Frq moy	Taux moy	Km	Frq moy	Taux moy	Km	Frq moy
DPH										
Actuel		49%	62565	1.07	72%	103332	1.33	84%	316332	2.61
Amont		60%	215		95%	3715		98%	5342	
Mutuel	Inter	60%	30259	1.19	86%	57547	2.53	89%	269052	4.36
Aval		51%	1678		80%	1545		97%	6640	
Moyenne / Somme		57%	32152		87%	62807		95%	281034	
Δ	Absolue	8%	-30413	0.12	15%	-40525	1.2	11%	-35298	1.75
	Relative	16%	-49%	11%	21%	-39%	90%	13%	-11%	67%
EP										
Actuel		38%	159701	1.02	60%	343824	1.16	85%	660980	2.85
Amont		89%	1505		90%	7525		98%	24561	
Mutuel	Inter	68%	69716	1.25	82%	200762	1.98	93%	553495	5.99
Aval		88%	3354		96%	12998		99%	27762	
Moyenne / Somme		82%	74575		89%	221285		97%	605818	
Δ	Absolue	44%	-85126	0.23	29%	-122539	0.82	12%	-55162	3.14
	Relative	115%	-53%	23%	49%	-36%	71%	14%	-8%	110%
LIQ										
Actuel		38%	221916	1.01	49%	309094	1.34	89%	1225127	3.65
Amont		89%	2584		98%	8070		99%	35980	
Mutuel	Inter	71%	97656	1.27	82%	239567	2.12	94%	1104345	7.44
Aval		82%	3797		94%	10558		98%	14910	
Moyenne / Somme		81%	104037		91%	258195		97%	1155235	
Δ	Absolue	43%	-117879	0.26	42%	-50899	0.78	8%	-69892	3.79
	Relative	112%	-53%	26%	86%	-16%	58%	9%	-6%	104%

Tableau 5.5 : Résultats sur taux de chargement, kilomètres parcourus et fréquence de livraison

5.4.2 Transport conjoint routier et ferroviaire

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

Par contre, il nous faut indiquer que le modèle ne prend pas en compte des contraintes opérationnelles, telles que la disponibilité d'infrastructures, la distribution de sillons, etc. Le modèle porte sur la performance globale de l'utilisation conjointe de deux moyens de

transport pour des mêmes couples origine destination mais avec en général des trajets plus longs pour le ferroviaire.

Groupes des fournisseurs	A	B	C	Σ
DPH				
Emissions actuelles	51	93	319	463
Emissions / mutualisation	28	44	157	229
Diminution	Absolue	23	49	162
	Relative	45%	53%	51%
				234
				50%
EP				
Emissions actuelles	132	309	670	1111
Emissions / mutualisation	67	210	257	534
Diminution	Absolue	65	99	413
	Relative	49%	32%	62%
				577
LIQ				
Emissions actuelles	183	291	1257	1731
Emissions / mutualisation	93	247	485	812
Diminution	Absolue	90	44	772
	Relative	49%	15%	61%
				919
				53%

Tableau 5.6 : Emissions de transport conjoint (routier et ferroviaire) en une semaine (tonne CO₂)

Les résultats du Tableau 5.6 montrent, notamment pour les fournisseurs appartenant au groupe C et moins pour les groupes B, que l'utilisation conjointe des moyens routiers et ferroviaires est un procédé très efficace pour diminuer les émissions du fait des faibles émissions des trains. L'intérêt de la mutualisation réside dans l'obtention de volumes suffisants à la fois pour charger des ½ trains et tout en respectant les volumes de livraison hebdomadaires, c'est-à-dire sans remettre en cause le service aux distributeurs.

En effet, le transport ferroviaire n'est pas du tout utilisé dans les groupes A, car la taille des flux même après mutualisation n'atteint pas la taille minimale des envois. En conséquence, la réduction des émissions reste au même niveau de l'optimisation avec le transport routier seul.

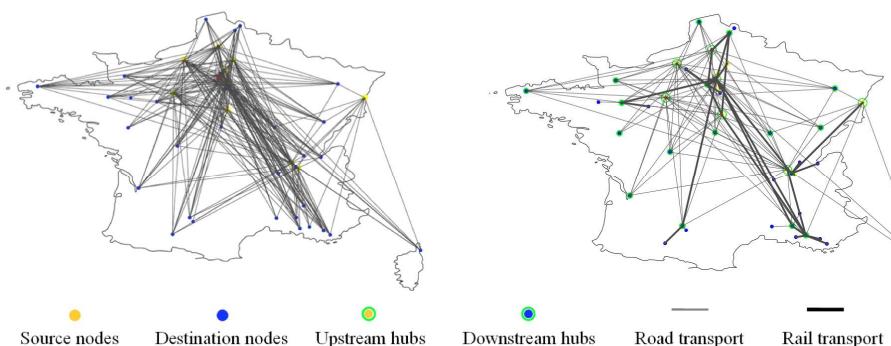


Figure 5.6 : Exemple du réseau de transport conjoint routier et ferroviaire avant et après mutualisation (Groupe C de DPH)

En comparaison avec la Figure 5.5 qui ne concerne que le transport routier, on peut facilement remarquer dans la Figure 5.6 que l'introduction du transport ferroviaire simplifie encore davantage le réseau de transport. De fait, les traits en gras signifient les schémas de transport ferroviaire retenus par le programme et se confondent avec les axes principaux des flux de la grande distribution en France, voir la Figure 5.6 comme exemple (pour l'ensemble des résultats, on peut se référer à l'Annexe 1). Ces résultats montrent que ces flux sont aux abords de lignes ferroviaires mais qu'il sera peut-être nécessaire de stimuler le développement des infrastructures ferroviaires le long de ces axes si le transport ferroviaire devait se développer et que les sillons devenaient disponibles.

5.4.3 Evaluation économique des solutions optimisées par les émissions

L'évaluation économique est fondée exclusivement sur le coût de transport. Sachant que le problème étudié ici ne concerne que les flux d'une semaine, donc le coût des stocks est considéré relativement comme peu variable, voir négligeables au niveau de la différence avec la stratégie actuelle. Il faut cependant noter que le coût des opérations de manutention sur les sites de mutualisation pourra être pris en considération pour les travaux qui se poursuivent, même si ce terme de coût n'est pas présenté dans cette étude dû au manque d'information concernant.

Dans le Tableau 5.7, il est illustré le coût de transport des schémas logistiques après mutualisation et en minimisant les émissions de CO₂. Le transport routier est le seul moyen considéré.

Groupes des fournisseurs	A			B			C			Σ		
	T CO ₂ *	10 ³ €	T CO ₂ *	10 ³ €								
DPH												
Actuel	51	43	93	115	319	546	463	704				
Après mutualisation	28	32	62	103	290	536	380	671				
Diminution	Absolue	23	11	31	12	29	10	83	33			
	Relative	45%	26%	33%	10%	9%	2%	18%	5%			
EP												
Actuel	132	114	309	375	670	1160	1111	1649				
Après mutualisation	67	84	219	353	628	1159	914	1596				
Diminution	Absolue	65	30	90	22	42	1	197	53			
	Relative	49%	26%	29%	6%	6%	0%	18%	3%			
LIQ												
Actuel	183	137	291	324	1257	1737	1731	2189				
Après mutualisation	93	93	255	318	1193	1716	1541	2127				
Diminution	Absolue	90	44	36	6	64	21	190	71			
	Relative	49%	32%	12%	2%	5%	1%	11%	3%			

Tableau 5.7 : Coût de transport des schémas après mutualisation et en optimisant les émissions de CO₂ au transport (transport routier seul)

On peut constater dans le Tableau 5.7 qu'il existe une corrélation entre les émissions de CO₂ et le coût de transport dans les 9 cas. Mais cette corrélation est moins évidente après la mise en place de la mutualisation après la diminution des émissions ou des coûts. D'un point de vue global, nous pouvons conclure que, avec le transport routier seul, la réduction des émissions et la réduction du coût de transport sont compatibles grâce à la mutualisation des flux résultant de la mise en commun des réseaux de distribution. Pour un moyen de transport unique, réduction des émissions et des coûts de transport sont de proportions différentes mais vont dans le même sens.

Cependant, les évaluations de coût des transports conjoints, routier et ferroviaire, montrent une situation différente quand le rail est sélectionné par l'optimisation, comme l'illustre Tableau 5.8. Cela se voit particulièrement dans les groupes C et moins dans les groupes B. Les groupes C ayant les fournisseurs à fort volume ont un coût de transport beaucoup plus élevé selon la structure des coûts actuelle, mais dans le même temps ont la meilleure performance en réduction absolue des émissions. Au total, la réduction des émissions de CO₂ de 52% est réalisée avec une augmentation du coût de transport de 85%.

Groupes des fournisseurs	A			B			C			Σ	
Emissions / Coût	T CO ₂ * 10 ³	10 ³ €									
DPH											
Actuel	51	43	93	115	319	546	463	704			
Après mutualisation	28	32	44	145	157	1202	229	1379			
Diminution Absolue	23	11	49	-30	162	-656	234	-675			
Relative	45%	26%	53%	-26%	51%	-120%	51%	-96%			
EP											
Actuel	132	114	309	375	670	1160	1111	1649			
Après mutualisation	67	84	210	450	257	2890	534	3424			
Diminution Absolue	65	30	99	-75	413	-1730	577	-1775			
Relative	49%	26%	32%	-20%	62%	-149%	52%	-108%			
LIQ											
Actuel	183	137	291	324	1257	1737	1731	2189			
Après mutualisation	93	93	247	351	485	3183	825	3627			
Diminution Absolue	90	44	44	-27	772	-1446	906	-1429			
Relative	49%	32%	15%	-8%	61%	-83%	52%	-65%			

Tableau 5.8 : Coût de transport des schémas après mutualisation et en optimisant les émissions de CO₂ au transport (transport conjoint : routier et ferroviaire)

Le Tableau 5.8 ci-dessus montre aussi qu'il n'y a aucun intérêt économique pour les chaînes logistiques des produits à forte rotation, y compris en mutualisant, à préférer une solution optimisée en émissions par le transport ferroviaire, car cette solution est beaucoup plus chère avec les tarifs des transports actuels en France. Cette constatation suggère que l'ajustement de prix au transport de fret routier peut éventuellement être un levier pour réduire l'empreinte écologique de la logistique par une taxe sur le CO₂, en complément de sa disponibilité.

5.4.4 Optimum de Pareto coût/émissions en transport conjoint

5.4.4.1 Optimisation économique du transport

Tous les résultats présentés dans les tableaux ci-dessus sont fondés sur la minimisation des émissions de CO₂. Pour mesurer la différence avec l'approche économique, nous utilisons également la fonction de coût de transport élaborée dans Chapitre 4 comme fonction objectif du modèle pour les mêmes problèmes de transport.

Dans un premier temps, le transport routier est étudié seul. Le Tableau 5.9 illustre les résultats de l'optimisation économique qui minimise le coût de transport et les émissions afférentes.

Groupes des fournisseurs	A		B		C		Σ	
	T CO ₂	10 ³ €	T CO ₂	10 ³ €	T CO ₂	10 ³ €	T CO ₂	10 ³ €
DPH								
Minimiser le CO₂	28	32	62	103	290	536	380	671
Minimiser le coût de transport	29	31	65	101	295	534	389	666
EP								
Minimiser le CO₂	67	84	219	353	628	1159	914	1496
Minimiser le coût de transport	70	86	224	339	645	1155	939	1580
LIQ								
Minimiser le CO₂	93	93	255	318	1193	1716	1541	2127
Minimiser le coût de transport	93	92	258	315	1217	1722	1568	2129

Tableau 5.9 : Emissions de CO₂ des schémas après mutualisation et en optimisant le coût de transport (transport routier seul)

Le tableau ci-dessus montre que les résultats des deux approches d'optimisation sont très semblables et que les différences sont en général à l'ordre de 3% ce qui est du même ordre que l'écart d'optimisation (entre la solution et la limite inférieure). Donc ces différences sont sans signification. La conclusion est qu'il existe une convergence entre les deux approches d'optimisation, émission et économique, pour les données de ces réseaux mutualisés par le transport routier seul alors même que les fonctions objectifs ont des valeurs bien différentes.

L'étude de l'optimisation économique du transport routier et ferroviaire dans les réseaux mutualisés conduit à des résultats similaires à ceux du Tableau 5.9. La raison fondamentale est que le prix de transport ferroviaire connu actuel est largement supérieur pour la plupart des schémas de transport. En conséquence, les schémas ferroviaires sont rarement sélectionnés par le programme d'optimisation.

Pour étudier la perspective du transfert entre le prix de transport et les émissions de CO₂, il est intéressant de faire varier de façon hypothétique le prix relatif des moyens de transport puis regarder l'impact sur le choix de mode, ainsi que sur les émissions.

5.4.4.2 Frontière d'efficacité émission/coût dans le transport conjoint

L'analyse sur les coûts des transports est fonction de la structure du prix des transports actuelle. Si l'on fait l'hypothèse que, dans un proche avenir, le coût du transport par chemin de fer pourrait augmenter moins rapidement que le coût du transport par la route, en raison de l'ouverture du marché de l'exploitation du transport ferroviaire et de la taxation (ex : taxe carbone) pour réduire les émissions de CO₂, quelle en serait l'impact sur l'attractivité économique du ferroviaire et sur les émissions ? Cette tendance est un contexte hypothétique

dans laquelle nous pouvons étudier le compromis entre économie et environnement du transport, de la même manière que la méthode heuristique proposée dans (Frota Neto et al., 2008) et (Frota Neto et al., 2009) pour trouver la frontière d'efficience de Pareto entre émission et coût.

La frontière d'efficience est composée d'un ensemble de solutions qui ont pour objectif d'optimiser conjointement l'allocation des moyens en fonction du coût et des émissions. Ces solutions sont un ensemble d'état dans lequel on ne peut pas améliorer la performance du coût ou des émissions sans détériorer l'autre.

Pour déterminer la courbe d'affectation optimale, nous calculons l'impact d'une variation relative du coût des transports routiers et ferroviaires dans le cadre d'un coût total normalisé. Cet impact est mis en œuvre avec un facteur a appliqué au coût de camion et un facteur b appliqué au coût de train. Selon le contexte hypothétique ci-dessus, le problème d'optimisation en minimisant le coût de transport conjoint est résolu à plusieurs reprises en faisant varier conjointement les facteurs a et b . Ainsi, la frontière d'efficience écologiqueéconomique est déterminée par la Figure 5.7.

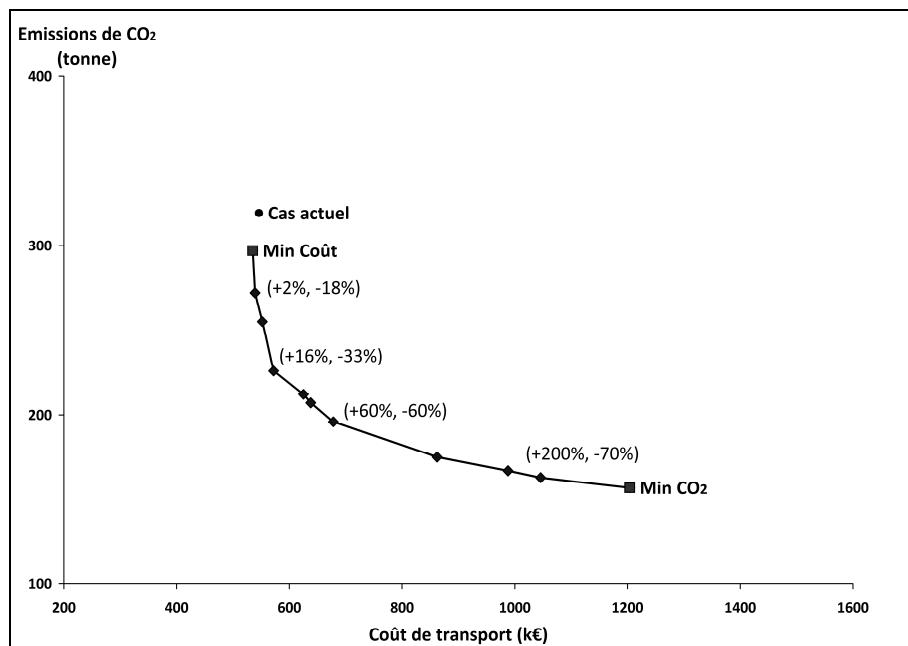


Figure 5.7 : Exemple de la frontière d'efficience de Pareto écologique/économique selon l'évolution hypothétique du prix des transports (routier, ferroviaire) (Groupe C de DPH)

La Figure 5.7 montre l'écart entre la solution économique (Min Coût) et la solution écologique (Min CO₂) dans l'exemple des flux à fort volume (groupe C) de la famille DPH. Elle révèle la forte sensibilité des solutions économiques aux émissions de CO₂, soumise à

une faible variation relative du coût de transport conjoint. La courbe dans la figure ci-dessus démontre que, dans le contexte où l'augmentation du coût de transport routier serait plus rapide que la diminution du coût du transport ferroviaire, la mutualisation des réseaux logistiques offre une solution peu attractive d'un point de vue économique mais améliore sensiblement les émissions minimales. Ce fait rend difficile une transition ferroviaire sur une base purement économique. Pour atteindre le minimum des émissions le calcul prévoit une variation dramatique de la structure de prix : coût du transport routier accru de plus de 200% et en même temps coût du transport ferroviaire diminué de plus de 70%. On doit cependant observer cette partie de la courbe comme plausible, car il est probable qu'une modification des prix même inférieure aurait une forte répercussion sur les volumes et donc un effet en retour sur les prix du ferroviaire.

Ainsi, la mutualisation des réseaux logistiques offrirait une solution intéressante à la fois sur le plan de l'efficacité économique et des émissions pour les flux importants.

5.5 Conclusion

A travers cette étude de cas des réseaux d'approvisionnement de la grande distribution de deux enseignes françaises et leurs 106 premiers fournisseurs communs, ce chapitre montre l'impact important de la mutualisation des schémas logistiques avec deux modes de transport, routier et ferroviaire, sur les émissions de CO₂. A la différence de la consolidation de lots au niveau opérationnel qui correspond bien souvent à une optimisation locale et ponctuelle opérée par un prestataire afin de mieux utiliser ses moyens de transport, la mutualisation par la mise en commun des schémas logistiques propose une solution plus ambitieuse et à plus long terme.

Cette démarche qui s'opère à un niveau plus stratégique représente une coordination plus complète et à plus long terme entre les acteurs afin de réduire le bilan carbone lié aux activités de transport de cette chaîne logistique (164 sites sources et 48 plateformes distributeur). Les résultats obtenus en réduction des émissions de CO₂ par la mutualisation par rapport à la situation actuelle, montrent que ce principe est pertinent. En n'utilisant que des moyens routiers, une réduction globale de 14% des émissions est possible sans mettre en cause le service offert aux enseignes. De plus, nous démontrons que l'utilisation conjointe de moyens

routiers et ferroviaires en France conduit à une réduction globale de 52% des émissions de CO₂ en ne considérant que deux enseignes.

Outre l'approche de l'optimisation des émissions, l'aspect du coût de transport a été également pris en considération et montre une forte convergence entre le coût de transport et les émissions dans le cadre de la mutualisation par les moyens routiers seuls. Cette convergence n'est plus constatale lors de la mutualisation par le transport conjoint routier et ferroviaire du fait de la structure de prix actuelle et de l'organisation logistique actuelle pour les flux importants.

Néanmoins, il faut noter que cette recherche ne prend pas en compte toutes les contraintes logistiques et tous les coûts. La première limite est que les schémas logistiques en mode ferroviaire ont été étudiés en compétition avec le transport routier. La disponibilité d'infrastructures (gares, plateformes inter-modalité, sillons, etc.) n'est pas prise en considération dans les solutions obtenues. De plus, la capacité des entrepôts, la contrainte au niveau du temps de transport, ou les parcours à vide sont des travaux éventuels à compléter avant la mise en œuvre des résultats.

Des recherches sont encore nécessaires pour généraliser ces premiers résultats obtenus dans un contexte spécifique. En premier lieu, nous indiquons de la mise œuvre de la mutualisation pourra apporter un impact sur les niveaux de stocks dans la chaîne. Il s'est avéré que la mutualisation peut augmenter la fréquence de livraison, cela induit une diminution des niveaux de stocks. A ce sujet, il serait utile d'étudier la mutualisation avec des flux multi-périodes.

Les travaux suivants pourront aussi se poursuivre au niveau du transport multimodal. Cette étude a exploré le transport combiné route-rail dans lequel le transport ferroviaire a un prix plus élevé. Or, les résultats peuvent être différents dans un pays où le transport par le rail est plus compétitif, dans ce cas la massification de flux par la mutualisation sera encore plus pertinente afin de reporter les flux vers le rail. De plus, le transport combiné peut aussi se faire sur les autres modes, par exemple avec le transport maritime ou fluvial, etc. La mutualisation pourra aussi être explorée en rapport avec ces moyens de transport pour diminuer les émissions.

Au niveau de l'optimisation, on pourra également ensuite entendre le périmètre d'étude par l'exploration du maillon plateforme-point de vente. On peut cependant envisager que la prise

en compte de cette partie de flux peut induire un problème très complexe, spécialement au niveau de l'optimisation.

Enfin, nous signalons que ce travail a fait l'objet de plusieurs communications dans le programme R2DS de la région Ile-de-France et dans des conférences scientifiques, et été récompensé à deux titres : « *The Best Industrial Engineering Research Paper Award* » et « *The Most Valuable Research Contribution Paper Award in Student Competition* » au congrès IESM 2009. Un article est accepté dans *International Journal of Production Economics*, voir Annexe 4.

Chapitre 6. Mutualisation entre des PME fournisseurs de la grande distribution : le cas de l'alimentaire dans l'ouest de la France

Alors que dans le chapitre précédent, nous avons travaillé sur les cent plus grands fournisseurs en volume communs à deux enseignes de la grande distribution, nous allons dans ce chapitre explorer le cas des PME (Petites et Moyennes Entreprises) fournisseurs de la grande distribution.

En effet, confrontées au problème de la standardisation de l'offre dans les magasins, les grandes enseignes ont intensifié depuis les années 2000 leurs relations avec les PME. De fait, certains petits fournisseurs locaux peuvent maintenant proposer des produits de qualité (des initiatives comme *Reflets de France* chez Carrefour ou *Nos régions ont du talent* chez Leclerc ont largement démontré que les PME pouvaient exister en GMS). Avoir ces produits régionaux en rayon peut alors représenter un avantage concurrentiel et apporter une image de qualité et d'authenticité liée aux produits du terroir.

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

L'importance des PME dans la grande distribution, notamment au niveau alimentaire, est de fait de plus en plus marquée, comme le montre le Tableau 6.1 qui reprend les statistiques de la FCD⁵². Bien que le nombre de PME fournisseurs de la grande distribution diminue sur la période 2003-2008, par contre leur contribution aux activités des points de vente augmente sur la même période : le nombre de références +2%, le Chiffre d'Affaires +3% et la présence en linéaire +3.5%. Cela s'explique en partie par la croissance des Marques de Distributeur (MDD).

⁵² Fédération des entreprises du commerce et de la Distribution : <http://www.fcd.asso.fr/index.php?page=14>

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

Tableau 6.1 : PME françaises dans la grande distribution alimentaire nationale

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

C'est pourquoi dans un premier temps, nous allons identifier les principales problématiques logistiques rencontrées par les PME qui fournissent les grandes enseignes. Puis, nous montrerons que la conception de schémas logistiques mutualisés peut être une solution pour remédier à ces problèmes en nous basant sur une étude réelle réalisée en Partenariat avec la FEEF⁵³ et Carrefour.

Cette étude de cas nous permettra de montrer les enjeux environnementaux et économiques associés à la mutualisation du transport sur un ensemble de PME de l'ouest de la France dans le domaine de l'alimentaire qui servent un même client distributeur. A cette fin, la situation actuelle a été comparée à différents scénarios de mutualisation définis de façon collégiale avec les partenaires de cette étude. La méthode retenue a consisté à évaluer l'existant par une enquête sur une plateforme logistique servie par les entreprises étudiées pour valider la base de données, puis à comparer cet existant à quatre scénarios types de mutualisation. Ces scénarios ont été évalués par le coût et les émissions de CO₂ en utilisant la modélisation définie dans le Chapitre 3. Les résultats obtenus montrent que la mutualisation conduit dans tous les cas à une réduction significative des émissions de CO₂ et à des variations de coût (impacts positifs ou négatifs en fonction de la stratégie de mutualisation retenue). Ce chapitre se conclura sur une tentative de généralisation de ces résultats.

⁵³ Fédération des Entreprises et Entrepreneurs de France : <http://www.feff.org/>

6.1 Les problématiques logistiques spécifiques aux PME fournisseurs de la grande distribution

Une enquête récemment réalisée (CNAM et ANIA, 2007) témoigne de la difficulté que les PME rencontrent au niveau de leurs activités de distribution. Cette l'enquête, dont l'objectif était de mieux connaître la situation et les problématiques actuelles des PME alimentaires en France, se base sur un échantillon de 70 PME, 85% d'entre elles ont la majorité de leurs flux amont et aval localisés en France. La logistique nécessaire à la gestion de ces flux est surtout problématique selon cette enquête.

« Les problématiques aigues rencontrées par les PME concernent principalement la pénurie et les coûts de transport, la difficulté de maintenir un niveau de service élevé, le manque de visibilité sur la demande client et l'absence de standards pour la mesure des performances logistiques. » (CNAM et ANIA, 2007)

En effet, d'après les résultats de cette enquête, parmi les dix neuf problématiques identifiées, les deux premières dans les catégories « fortement ressentie » et « très fortement ressentie » sont la pénurie des moyens de transport (70%) et la difficulté de maintenir un taux de service client élevé (60%). En général, ce qui a été souligné dans le deuxième chapitre, les commandes des distributeurs, suivant une logique de tension des flux, sont de façon tendancielle plus petite en volume, mais plus fréquentes afin de baisser le niveau des stocks. En conséquence, cela peut éventuellement diminuer la productivité des transports, en réduisant le taux de remplissage des moyens et en augmentant le nombre de transports à vide (Nefussi et Saidi-Kabeche, 2006). De ce fait, les fournisseurs, afin de satisfaire le taux de service exigé par les clients distributeurs, s'interrogent sur les pratiques à mettre en œuvre pour répondre aux exigences de la grande distribution en termes de fréquence de livraison sans voir leurs coûts logistiques exploser.

De plus, dans le cadre du développement durable, les PME fournisseurs n'échappent pas à la pression croissante pour identifier les conditions qui vont améliorer l'impact environnemental imputé au transport notamment leur empreinte carbone. La Figure 6.1 illustre la relation entre ces trois aspects. On peut voir que la fréquence de livraison est le principal facteur qui peut concilier la satisfaction de la commande client et la demande de transport, ainsi que les impacts sur l'environnement dus au transport. Cette double contrainte,

économique et écologique devient un réel défi à relever pour les acteurs de la chaîne logistique et notamment les PME.

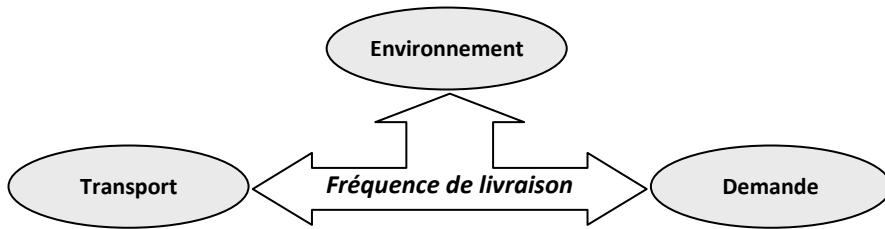


Figure 6.1 : Majors problématiques de la distribution

La difficulté relative au transport est encore plus marquée pour les PME car elles « *ne parviennent plus à se faire livrer leurs besoins en matières premières et emballages et à faire enlever leurs produits finis faute de volumes suffisants pour les transporteurs* » (CNAM et ANIA, 2007). Même si les PME ont un intérêt à développer leur système logistique, elles sont souvent freinées par leur manque de connaissance des enjeux stratégiques de la logistique, leur manque d'information sur les bonnes pratiques logistiques et leur manque de temps. Elles sont également pénalisées par leurs faibles volumes peu attractifs pour les transporteurs.

Comme le montre (Messeghem, 2003a), l'accroissement du pouvoir de la grande distribution lui permet de dominer sa relation avec les producteurs, notamment avec les PME, qui sont obligées de concentrer de plus en plus leurs efforts sur la distribution. Cependant, cette démarche est souvent atténuée par les ressources limitées dont les PME disposent notamment au niveau des techniques de gestion, du système d'informations ou des moyens de transport. Ainsi le développement du système logistique des PME n'est pas aussi rapide que pour les grandes entreprises.

D'autre part, en raison de leur capacité de production limitée, la taille de livraison des PME est, en général, beaucoup plus petite que celle des fournisseurs à fort volume. De ce fait, il est plus difficile pour ce genre de fournisseurs de saturer les moyens de transport. Dans ce contexte, l'augmentation du coût du transport (due notamment à l'évolution du prix du baril de pétrole) et les pressions liées au développement durable (possible fiscalité, impact sur l'image de marque...) conduisent les PME à rechercher des démarches « durables » leur permettant de répondre aux exigences de leur client sans pour autant augmenter le poste budgétaire de la logistique. La mutualisation logistique proposée dans cette thèse peut être une solution pour répondre à ses différents enjeux. En effet, la mutualisation, en s'appuyant

sur un partage des ressources logistiques entre différents donneurs d'ordre pour mieux remplir les moyens de transport, doit permettre une diminution de la demande de transport et donc « atténuer » la pénurie de transport qui est la première préoccupation pour les PME. Cette assertion est corroborée par l'étude menée par le CNAM et l'ANIA en 2007, dans laquelle, 50% des entreprises interrogées souhaitaient jouer un rôle de promoteur de la mutualisation des ressources logistiques. Aujourd'hui, les PME qui fournissent la grande distribution sont encore très nombreuses et génèrent une multitude de petits flux (en palettes). Mais, plus encore que les gros fournisseurs qui disposent de prestations sur mesure liées à leurs flux, ces entreprises sont aujourd'hui préoccupées par leur logistique. Par exemple, dans l'étude (Messeghem, 2003a) concernant une analyse stratégique des relations entre PME et grande distribution en France, il est démontré que les PME en France font face à de grandes difficultés pour satisfaire l'exigence de distributeurs, à la fois sur le coût et l'approvisionnement.

Etant donné la caractéristique des flux de PME et les principes de mutualisation, ces petites entreprises par leurs flux difficiles à massifier ne seraient-elles pas finalement un lieu d'expérimentation privilégié pour la mutualisation ?

C'est dans ce contexte que le comité logistique de la FEEF a décidé de lancer une étude sur les enjeux économiques et environnementaux de la mutualisation appliquée aux entreprises affiliées. Les résultats de ce projet pourraient servir à promouvoir ce genre d'organisation logistique auprès de ses membres. Par conséquent, au 1er semestre 2008, les adhérents de la FEEF ont été consultés afin de connaître le potentiel d'un tel projet : 79 entreprises ont confirmé leur intérêt pour ce genre de démarche alors qu'aucun travail de promotion ou de pédagogie n'avait été mené de façon approfondie. Ces chiffres confirmaient donc le potentiel de cette action. Du côté des distributeurs, la Société Carrefour qui est la plus grande enseigne française a pris part à ce travail. Dans le cadre de ce projet, l'enseigne a contribué à cette démarche en apportant des données sur ses flux en provenance des adhérents de la FEEF et des entreprises similaires susceptibles de rentrer dans la démarche.

La FEEF (Fédération des Entreprises et Entrepreneurs de France) créée en 1996 regroupe environ 600 entreprises familiales, fournisseurs du commerce moderne (Grande Distribution & Réseaux de Restauration Hors Domicile). Ces entreprises indépendantes, principalement des PME et TPE de toutes tailles, interviennent sur les marchés alimentaires et non alimentaires de l'ensemble du territoire français et à l'export.

Au quotidien, la FEEF conduit une politique de concertation avec l'ensemble des enseignes de la Distribution et de ses représentants afin de développer des relations constructives et favoriser la croissance des parts de marché des PME.

La FEEF structure son action autour de Groupes de Travail par enseignes et intervient sur des sujets techniques tels que notamment la logistique ou la qualité.

Encadré 5 : Présentation de la FEEF

Afin de répondre à la dimension environnementale de ce travail de recherche, nous avons choisi comme objectif de minimiser les émissions de CO₂ lié au transport puis évaluer l'impact économique d'une telle solution logistique mutualisée. Autrement dit, l'ambition de cette étude est : «*de tester environnementalement et économiquement un schéma du transport mutualisé qui permet d'obtenir un meilleur taux de remplissage des moyens de transport tout en conservant et/ou en améliorant les fréquences de livraison entre les fournisseurs et la grande enseigne*». Dans un deuxième temps, l'optimisation économique sur la même base de données est réalisée afin de comparer les résultats des deux démarches d'optimisation. Cependant, il est important de noter que le but de ce projet n'était pas de définir la meilleure stratégie de mutualisation, mais de montrer la performance de chaque scénario de mutualisation qui sera étudié.

6.2 Méthodologie et modélisation des scénarios de mutualisation

Le groupe de réflexion logistique de la FEEF a envisagé une collaboration afin, d'une part, d'identifier les opportunités de mutualisation en fonction des taux de remplissage des camions et, d'autre part, d'évaluer les gains potentiels relatifs à cette mutualisation sur le plan environnemental.

Comme le montre la Figure 6.2, ce projet a été mené en 3 étapes :

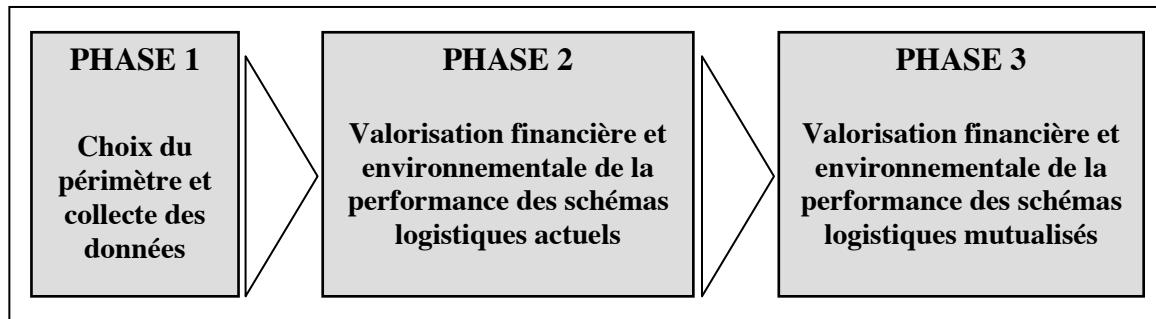


Figure 6.2 : Méthodologie de l'étude de cas

- 1) La première phase a consisté à collecter l'ensemble des données nécessaires pour alimenter notre démarche de modélisation et à prendre en compte les attentes et les contraintes de chacun des acteurs notamment dans le choix des schémas logistiques mutualisés que l'on pourrait retenir afin de les valoriser voir la partie 6.2.1 ;
- 2) La deuxième phase a été conduite afin d'obtenir une valorisation environnementale et économique de la performance du schéma logistique actuel en analysant les organisations du transport, voir 6.2.2 et 6.2.3 ;
- 3) La troisième phase a eu pour objectif de valoriser aux niveaux environnemental et économique la performance des schémas logistiques mutualisés, pour la zone géographique considérée, afin d'identifier les gains potentiels d'une telle démarche, voir 6.2.4 et la présentation des résultats. A cette fin, les modèles d'optimisation développés dans le chapitre 4 ont été mis en œuvre pour chaque scénario testé.

6.2.1 Définition du périmètre de l'étude et préparation de la base de données

Dans un premier temps, en accord avec les partenaires de cette étude, nous avons décidé de fixer le périmètre d'étude à la région Grand Ouest⁵⁴ qui regroupe les régions de la Bretagne, de la Basse Normandie et des Pays de Loire, et en particulier sur le secteur alimentaire dans la catégorie d'épicerie (voir les paragraphes ci-après sur la base de données). Ce périmètre est défini en se basant sur une base des ressources logistiques au sein de la FEEF, à savoir plus de 200 fournisseurs et 5 plateformes du distributeur régionales. Toutefois, un seul distributeur est concerné dans cette étude et cela peut être considéré comme une limite de ce travail.

⁵⁴ Les départements suivants sont dans le périmètre de l'étude : 14, 61, 50, 72, 53, 49, 44, 85, 35, 56, 22, 29.

Une fois que le périmètre est déterminé, il nous fallait élaborer une base de données pertinente pour l'étude, or obtenir des données homogènes de flux sur un échantillon de PME est une tâche très difficile et fastidieuse. Pour faciliter ce recueil de données, nous avons travaillé sur les données de l'enseigne partenaire du projet : Carrefour. Cette implication a permis de collecter l'ensemble des données de livraison de ces fournisseurs sous un même format et en provenance d'une seule base de données.

La base de données ainsi recueillie comprend les flux sur 35 semaines, du 31.01.2008 au 30.09.2008, au site (dépôt ou usine) des 231 fournisseurs identifiés sur les 5 plateformes du distributeur dans la région considérée (Carpiquet, les 2 entrepôts du Mans, Cholet, Le Rheu). La Figure 6.3 illustre la répartition des flux par rapport à chaque plateforme, y compris le nombre des fournisseurs concernés dont la somme des livraisons effectuées et des palettes⁵⁵ envoyées dans la période étudiée.

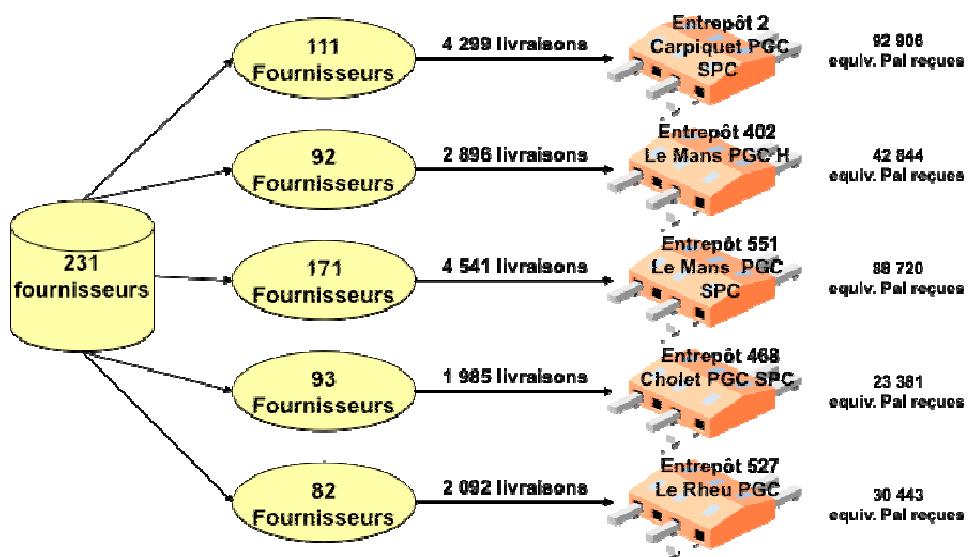


Figure 6.3 : Répartition des fournisseurs et des flux de la base

Pour des raisons d'organisation de l'enseigne, les données comportaient des fournisseurs de Brasserie et de lait UHT ainsi que quelques fournisseurs trop importants et quelques fournisseurs « anecdotiques » (1 palette par an). En matière de volume des fournisseurs, (Ballot et Fontane, 2008a) ont montré les difficultés de mutualiser des partenaires trop différents au niveau des volumes expédiés. De ce fait, il a été considéré que les fournisseurs trop importants à savoir ayant 35 commandes ou plus sur la période étudiée avec des

⁵⁵ Unité en palette hétérogène en équivalent d'une palette complète, de même pour la suite

commandes composées majoritairement de 22 palettes et plus seraient exclus de la base de données.

De plus, sur les 35 semaines, la première période et la dernière période ont ensuite été retirées, car elles n'étaient pas représentatives. En effet, le niveau de flux de ces deux semaines est largement en dessous du niveau des autres 33 semaines. La raison est que les données ont été extraites en respectant strictement l'horizon de temps, par conséquent, les données de la première et la dernière période sont incomplètes.

Ainsi, la base de données de cette étude concerne les flux de 154 fournisseurs d'épicerie sur un horizon de 33 semaines au départ de leurs entrepôts ou de leurs usines (codés en longitude et latitude) vers les 5 plateformes du distributeur.

Nous avons ensuite établi une cartographie des fournisseurs et de leurs volumes en palette sur la période observée et la région considérée. Elle permet déjà de voir que des regroupements seront possibles, comme le montre la Figure 6.4.

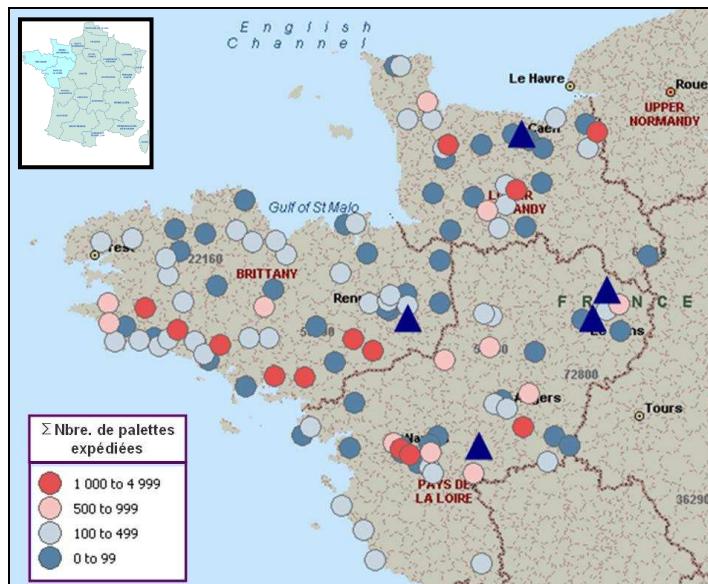


Figure 6.4 : Localisation des fournisseurs (cercle) et des plateformes du distributeur (triangle)

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

6.2.2 Valorisation des schémas logistiques actuels de l'étude

Pour juger de l'opportunité de mettre en œuvre des principes de mutualisation, nous avons pris l'existant comme référence. Cette analyse de la situation actuelle doit permettre, d'une part, d'appréhender les organisations logistiques mises en œuvre par les fournisseurs de Carrefour et d'autre part, de passer des flux en volume aux taux de chargement des camions pour chaque expédition. Par contre, cette conversion n'est pas simple à réaliser ni à systématiser pour tous les fournisseurs, car la logistique de la plupart de ces entreprises est gérée par les prestataires différents qui effectuent souvent leur mission en fonction de leurs contraintes opérationnelles.

Au regard de cette difficulté, nous avons choisi d'examiner les livraisons sur une plateforme de distribution. La plateforme logistique retenue est celle située au Mans et codée 551 dans la Figure 6.3. Le choix de cette plateforme s'explique par le fait que dans le panel retenu c'est celle qui accueillait le plus de livraisons parmi les cinq plateformes de l'étude. L'analyse terrain que nous avons conduit s'est déroulée sur une période de temps limitée du 20/04/2009 au 24/04/2009. Cette démarche a eu pour objectif principal de quantifier la charge réelle des camions en arrivée sur la plateforme. De plus, nous avons complété cet examen empirique par un questionnaire auprès des chauffeurs afin de mieux comprendre l'organisation du transport en amont (le questionnaire administré auprès des chauffeurs est consigné dans l'Annexe 2).

6.2.2.1 Analyse de l'existant sur une plateforme distributeur

En premier lieu nous avons cherché à savoir si la plateforme située au Mans, était similaire en termes de taille de ses livraisons à celles des quatre autres plateformes du distributeur dans le périmètre géographique retenu. A cette fin nous avons construit un test de la différence entre les moyennes des tailles de livraisons de la plateforme de l'enquête et les moyennes des autres plateformes sur la base des 33 semaines. La valeur de p calculée (test unilatéral et hypothèse de variances égales) $p=0,23$ permet de valider l'hypothèse de livraisons moyennes identiques entre l'entrepôt du Mans et les autres plateformes du périmètre géographique identifié.

De plus, pour vérifier la représentativité des données de livraison de la semaine de l'enquête par rapport aux 33 autres semaines de la base de données, un nouveau test de

différence entre les moyennes des tailles de livraisons a été réalisé. La valeur de p calculée (test unilatéral et hypothèse de variances égales) $p=0,40$ permet de valider l'hypothèse que les livraisons moyennes sont identiques entre la période observée et les données de la base sur l'ensemble de l'horizon temporel.



Figure 6.5 : Exemples de contenu des camions en arrivé à quai

Sur le site du Mans nous avons pu disposer d'une semaine d'enquête. Celle-ci a permis de recenser et d'observer 54 livraisons de 39 fournisseurs par 32 camions de capacité de 33 palettes (semi-remorque). Quelques exemples représentatifs des chargements sont montrés dans la Figure 6.5. Cette enquête a montré que les coefficients de chargement globaux en volume et en surface des camions pour les 32 camions sont :

- **Taux en surface : 84% (27,6 palettes au sol / 33)**
- **Taux en volume : 67%**

Ce résultat est supérieur aux enquêtes disponibles, voir (McKinnon et al., 2003), (Léonardi et Baumgartner, 2004) ou (Ballot et Fontane, 2008a), et il indique donc une organisation logistique performante pour les 39 fournisseurs de l'échantillon. En effet, il existe des regroupements de livraisons dans un même camion. Le Tableau 6.2 détaille de manière quantitative les organisations logistiques recensées lors de notre enquête témoin.

Supply		Livraison		Drop					
				Mono			multi ⁵⁶		
		nbre cas	Surface	Volume	nbre cas	surface	volume		
Pick	mono	1 frn	5	87%	68%	5	50%	43%	
		n frns	2	100%	65%	2	97%	75%	
	multi	4	92%	68%	4	90%	80%		

Tableau 6.2 : Organisations logistiques identifiées par les entretiens avec les chauffeurs et les coefficients de chargement associés

⁵⁶ A cause de l'ordre de service en multi-drop, le taux de remplissage pour certains cas est relativement bas.

Parmi les 32 camions étudiés, nous avons pu consulter 22 chauffeurs et leur soumettre un questionnaire afin de mieux comprendre l'organisation du transport en amont, par exemple identifier le lieu de départ, déterminer le nombre de km parcouru, comptabiliser le nombre de stop, etc. Il faut cependant se garder de les généraliser en ce sens du fait du faible nombre d'occurrences et de la connaissance très limitée sur ces organisations et leur contexte. Néanmoins, ces questionnaires confirment l'existence de plusieurs organisations : 23% des réponses concernent des livraisons d'un seul lieu d'enlèvement d'un fournisseur vers un seul point de livraison. On constate également (2+2) cas de consolidation sur un terminal (plusieurs fournisseurs en un seul enlèvement). Malgré l'existence de ces organisations entre les fournisseurs, le taux de chargement, surtout en volume, peut être amélioré.

6.2.2.2 Evaluation de la performance des schémas logistiques actuels

A travers l'enquête sur la plateforme du distributeur dont le Tableau 6.2 recense les principaux résultats, on peut constater qu'il existe déjà des organisations logistiques communes entre certains fournisseurs retenus dans notre étude. Mais malheureusement le résultat ne nous permet pas d'évaluer de manière précise la performance des schémas logistiques actuels car il concerne seulement un sous-ensemble mais pas la totalité des fournisseurs de l'étude. De plus, la plupart des fournisseurs recourent à des prestataires pour le transport, et il est quasi impossible de connaître précisément la stratégie de transport utilisée. En conséquence, nous devons formuler une hypothèse sur la stratégie de transport à retenir.

Le Tableau 6.2 fait apparaître que la tournée de collecte, en amont et en aval, qui concerne 15 cas sur 22 est relativement en position dominante par rapport aux autres solutions. De plus, les membres du comité logistique de la FEEF, qui sont des directeurs logistiques représentant des PME adhérentes, ont souligné que la pratique des tournées de livraison était répandue dans leurs entreprises au regard de la fragmentation des volumes et des grappes de localisation des fournisseurs qui apparaissent sur la carte de la Figure 6.4. Cela favorise la logique de ramasse pour des livraisons vers les plateformes du distributeur. C'est pourquoi, nous allons supposer pour modéliser la situation actuelle que les flux sont transportés par cette stratégie de tournée de collecte.

En plus, sachant que le taux de chargement en surface des camions constaté à la plateforme est de 84% qui est esquivent de 27 palettes au sol, on peut faire l'hypothèse que les camions à

la fin du trajet en tournée pour collecter des frets sont chargés de 27 palettes, autrement dit les camions de référence comportant 27 palettes. Cela conduit à présumer que les livraisons qui ont plus de 27 palettes sont divisées en deux composants : la première partie est livrée toujours en camions complets à 27 palettes en trace directe de fournisseur à distributeur, puis la deuxième partie restante qui est inférieure à 27 palettes est livrée en TV soumis à la collection d'autres flux de moins de 27 palettes. Par exemple, pour une livraison de 60 palettes, il est fait l'hypothèse qu'elle est effectuée par deux fois de livraisons directes (2×27) puis une livraison en tournée avec les autres fournisseurs (pour les 6 palettes qui restent). Il s'agit d'une hypothèse conservative, car donnant une performance élevée pour la performance de la logistique actuelle.

Nous devons par la suite évaluer quantitativement les émissions de CO₂ et les coûts logistiques. Logiquement, nous supposons que la solution actuelle de type tournée de livraison avant mutualisation est déjà optimisée par les transporteurs. Mais par contre nous n'avons pas la possibilité de connaître les trajets exacts des tournées réalisées. C'est pourquoi, la méthode **NVRM** (*Non-detailed Vehicle Routing Models*) proposée par Daganzo est adaptée pour estimer les trajets des tournées, voir (Daganzo, 2005) et (Langevin et al., 1996).

Le principe de cette méthode est d'optimiser approximativement la somme des distances des tournées dans un réseau avec n points à visiter (notamment n à grande échelle) dans une région R . L'avantage de ce genre de modèles est que l'on peut évaluer globalement la performance des tournées sans explorer les détails des trajets. De ce fait, il s'agit d'une approche qui est une première approche par rapport aux modèles optimisant trajet par trajet.

Vu que les plateformes du distributeur dans l'étude sont traitées indépendamment les unes des autres, cela revient à tester pour chacune, un réseau de distribution de type *Many-to-One*. Mathématiquement, cela équivaut à un problème avec un réseau de livraison de type *One-to-Many*. De plus, au cas où il existe un certain nombre de prestataires qui s'occupent des transports dans la région, le nombre de tournées est assez grand. En conséquence, nous choisissons de recourir à une approche NVRM pour le cas *One-to-Many* Distribution Network avec de nombreuses tournées, (Daganzo, 2005) p.77. La formule finale pour calculer la distance totale est :

$$\text{Distance totale} \approx \frac{2E(r)}{C} N + k\sqrt{|R|N} \quad 6.1$$

Dans la formule (6.1), $E(r)$ est la distance moyenne entre la plateforme et chaque point à visiter. Sachant que nous avons les coordonnées géographiques de tous les points dans la région, une matrice de distance peut être élaborée pour calculer $E(r)$. Particulièrement, comme les trajets de retour à vide ne sont pas considérés dans cette étude, le facteur 2 avant $E(r)$ qui représente les trajets aller-retour est réduit à 1 dans ce cas. C est le nombre d'arrêts lors d'un trajet de tournée, il est fait hypothèse que $C=3$ selon l'enquête à la plateforme. N représente les points à visiter, autrement dit les sites des fournisseurs. R représente la région et donc $|R|$ est la surface de la région⁵⁷. Le facteur k est le constant fondamental en dépendant de la métrique. Vu que le calcul est pour estimer la distance de livraison entre deux points dans la région, il est considéré que L_1 métrique⁵⁸ est plus correct dans ce cas, d'où $k=0,82$ (Daganzo, 2005) p.100. Jusqu'à maintenant, les paramètres dans (6.1) sont tous déterminés, on peut alors calculer la distance totale approximative pour les livraisons par plateforme, ainsi que la distance moyenne en points en tournée.

Par contre, malgré le fait que la distance entre deux points, par exemple A et B, lors d'un trajet de tournée est déterminée, il n'est pas possible de calculer précisément les émissions ou le coût de transport (y compris le coût pour chaque arrêt du véhicule) entre A et B, puisque ces deux valeurs dépendent du chargement réel sur le trajet. Par exemple, sans avoir les détails sur les tournées, le camion arrive à A contient éventuellement la charge de A-1 qui est inconnue selon l'approche NVRM.

C'est pourquoi nous avons fait deux hypothèses pour valoriser économiquement et écologiquement les schémas optimisés. La première est déterminée en faisant l'hypothèse (**H1**) que tous les trajets sont indépendants, c'est-à-dire que, dans un trajet de A à B, seulement la charge de A est considérée dans le calcul des émissions ou du coût, d'où

$$\text{Emissions ou Coût (AB)} = f_{\text{coût/ émissions}}(\text{charge AB}) \times d_{AB}$$

avec $f(x)$ qui est la fonction de coût ou d'émissions de transport en fonction de la charge. Deuxièmement, on peut calculer la valeur moyenne d'un **trajet en prenant le chargement**

⁵⁷ La surface des 12 départements concernés dans l'étude se réfère au site

http://www.insee.fr/en/themes/tableau.asp?ref_id=nattef01209

⁵⁸ L_1 métrique : $d(x_1y_1, x_2y_2) = |x_1-x_2|+|y_1-y_2|$

moyen (H2). Sachant qu'il est fait l'hypothèse que les camions qui arrivent à la plateforme sont considérés chargés complètement avec 27 palettes (voir l'hypothèse de l'opération de transport ci-dessus), nous pouvons définir de manière générale que le chargement moyen sur un trajet est de 14 palettes, d'où $Emissions ou Coût (AB)=f(14) \times d_{AB}$. En considérant ces deux hypothèses, nous pouvons déterminer une estimation de la valorisation de la situation actuelle au niveau des émissions de CO₂ et du coût. Les résultats sont présentés dans le Tableau 6.3 (pour les critères d'évaluation on peut se reporter au paragraphe 6.2.3).

Hypothèses	Emissions de CO ₂ (T)	Coût de transport (k€)
H1	646	943
H2	689	1171

Tableau 6.3 : Estimation de la performance des schémas logistiques actuels selon deux hypothèses

Evidemment H1 est plus restrictive que H2, comme le montre les résultats. Imaginons que H0 soit la valeur réelle des émissions ou du coût des tournées du cas actuel, il est assez évidant que l'on a H1<H0, mais la relation entre H0 et H2 est beaucoup plus difficile à estimer. C'est la raison pour laquelle les résultats de l'hypothèse notée **H1 sont pris en compte** dans cette étude et dans les publications la concernant, voir (Pan et al., 2010b) et (Pan et al., 2010a), même si cela conduit naturellement à une sous-estimation des émissions de CO₂ et du coût du transport de la situation actuelle.

6.2.3 Mises en place des critères d'évaluation

Dans le chapitre 4 nous avons développé la modélisation des émissions de CO₂ du transport des marchandises et le coût logistique. Cette modélisation est mise en œuvre dans cette partie pour évaluer la performance environnementale et économique des scénarios de mutualisation envisagés dans le cas des PME du grand ouest français servant le distributeur Carrefour.

L'aspect environnemental sera mesuré par les émissions de CO₂. Le périmètre de calcul se limitera aux activités de transport comme ce qui a été mentionné dans le Chapitre 1.

Sur le plan économique les coûts seront évalués par quatre composantes : le coût de transport, le coût de passage (flux entrée/sortie) par entrepôt, le coût de transfert en cross-docking, le coût d'un stop lors d'un trajet en tournée (coût par arrêt de véhicule), et le coût de

stockage. Les différents termes de ces coûts ont été explicités au Chapitre 1, ainsi que le calcul des paramètres respectifs qu'ils intègrent.

L'optimisation se portera dans un premier temps sur les coûts de transport et le coût de passage des flux (entreposage ou cross-docking), sauf pour l'opération de transport en tournée de livraison avec l'intégration des coûts de stop lors de la tournée, voir les scénarios 3 et 4 dans le paragraphe 6.2.4. Dans cette étude, le coût de stockage n'est pas optimisé conjointement avec le coût de transport, il sera évalué pour chaque scénario après optimisation afin de montrer l'impact de la mutualisation sur l'évolution des niveaux de stock.

6.2.4 Présentation des différents scénarios de mutualisation et modélisation

D'après la définition présentée dans le Chapitre 1, on sait que la mutualisation peut se concevoir de différentes manières et à différents niveaux, par exemple dans les moyens de transport ou dans les points de stockage. Dans cette étude, il semble que plusieurs solutions soient possibles pour réaliser la mutualisation des chaînes logistiques des PME. En effet, les solutions possibles se basent sur les travaux de (Hall, 1987) et (Pooley et Stenger, 1992) sur la consolidation. Ils ont synthétisé les stratégies fondamentales de consolidation selon quatre niveaux: *Inventory Consolidation*, *Shipment Consolidation*, *Vehicle Consolidation* et *Network Consolidation*. Ces différentes stratégies sont mobilisées dans cette étude afin d'identifier les possibilités de mutualisation.

Avant tout, il est important d'expliquer que les solutions retenues doivent conserver le niveau de service initial à la maille de la semaine, voire l'améliorer. Comme les PME retenues dans cette étude ont des flux difficiles à massifier en raison des petits volumes à expédier et de la haute fréquence de livraison élevée imposée par le distributeur, nous proposons de réaliser la mutualisation à deux niveaux : le réseau et les opérations de transport.

D'abord, pour massifier les flux, on peut éventuellement introduire un entrepôt intermédiaire (hub) qui supporte des stocks ou non entre les sites des fournisseurs et les plateformes du distributeur (le cas où il est ouvert plus d'un centre intermédiaire n'est pas discuté dans cette étude en raison du périmètre réduit au niveau régional). Deuxièmement, au niveau tactique/opérationnel, la livraison peut être réalisée en trace directe ou schémas des tournées de véhicules et on peut modéliser un moyen à charge complète (*TL* : *Full Truckload*) ou non (*LTL* : *Less-Than-Truckload*). Le principe de ramasse selon une tournée n'aura lieu

qu'entre les fournisseurs (*Multi-pick*) et ne sera pas appliqué pour les plateformes du distributeur (*Multi-drop*), car les distances qui les séparent sont importantes. Autrement dit, les plateformes seront servies de manière indépendante dans chaque scénario. De ce fait, si l'on considère l'ensemble de ces alternatives, on peut recenser 9 cas comme l'illustre le Tableau 6.4.

Opération	Réseau	Sans hub	Avec un hub intermédiaire	
			Avec stock	Sans stock
Direct	TL	A (Minimum)	D (Scénario 1)	G
	LTL	B	E	H (Scénario 2)
Tournée de véhicule		C (Scénario 4)	F (Scénario 3)	I

Tableau 6.4 : Possibilités de la mutualisation aux PME régionales de la grande distribution

Nous allons présenter chacun de ces cas, en soulignant la stratégie retenue et les impacts a priori sur les dimensions environnementales et économiques :

(A) Flux en trace directe en TL: il s'agit du cas où les livraisons sont effectuées systématiquement par les camions complets (à 33 palettes). De ce fait, c'est le scénario qui offrira le meilleur bilan d'émissions. Toutefois, si chaque fournisseur est capable d'envoyer ses flux indépendamment en TL, ce scénario ne repose pas sur une démarche de mutualisation, mais il est intéressant pour identifier et quantifier la borne inférieure des émissions sur la région concernée pour toute la période de l'étude. De ce fait, cette borne est nommée le « Minimum » des émissions dans les résultats. Or, il est nécessaire d'indiquer que cette bonne solution au sens écologique n'offrira certainement pas un bilan économique aussi favorable. La raison est que la stratégie de livraison en TL, qui favorise le coût de transport, est souvent au prix d'un niveau des stocks plus élevé. Ce problème se pose également pour les scénarios D et G et l'évaluation économique sera faite pour le cas D.

(B) Flux en trace directe en LTL : au contraire du cas précédent, le cas (B), qui signifie que les flux à la semaine sont envoyés directement de chaque fournisseur au distributeur, propose une solution qui favorise le service au client, mais qui dégrade la productivité du transport (en le taux de remplissage et en trajets retour à vide). Puisque les PME ont des expéditions relativement faibles en volumes, cette solution augmente considérablement le coût du transport ainsi que les émissions. De façon similaire au cas (A), ce scénario se fonde également sur les livraisons de chaque fournisseur indépendamment des autres, il ne concerne donc pas le principe de mutualisation.

(C) Livraison en tournée de livraison sans hub : originellement, il s'agit de la stratégie multi-pick entre les sites des fournisseurs ou multi-drop entre les plateformes du distributeur. Dans cette étude, nous ne traitons que les tournées en amont, c'est-à-dire le schéma nommé multi-pick et mono-drop. Par conséquent, cela correspond à un réseau *Many-to-One* (Daganzo, 2005) discuté dans la partie concernant l'évaluation du cas actuel.

(D) Flux en trace directe en TL en passant par un centre de stockage : Par rapport au cas (A), nous introduisons un hub de mutualisation qui massifie les flux amont d'un certain nombre de fournisseurs. Les flux sont ainsi regroupés puis envoyés selon les demandes vers les plateformes du distributeur. Comme le principe de TL est appliqué pour tous les camions entrant et sortant des hubs de mutualisation, nous pouvons supposer que cette solution présentera un bilan positif aussi bien pour les émissions de CO₂ que pour le coût du transport.

(E) Flux en trace directe en LTL en passant par un centre de stockage : par rapport au cas (D), ici les livraisons amont et aval ne sont plus toujours en TL. En théorie, les stocks des fournisseurs seront déplacés vers l'entrepôt commun. En conséquence, la taille d'envoi du fournisseur dépend de la taille du lot de production (les produits finis sont livrés immédiatement à l'entrepôt après la production en lot). Cependant, ces informations ne sont pas disponibles, en effet, il est difficile de recenser l'ensemble de ces données pour chaque fournisseur et chaque référence, de plus la taille de lot varie selon le producteur et la SKU (*Stock-Keeping Unit*) concernée. Néanmoins, nous pouvons analyser l'impact de la taille de lot. En effet, pour être favorable au transport, la taille devrait être équivalente au volume du TL, dans ce cas-là nous nous ramenons au cas (D). Sinon, pour minimiser le niveau de stock, la taille correspondrait à la demande hebdomadaire, alors c'est exactement le scénario H qui va être présenté ci-après.

(F) Livraison par tournée de collecte en passant par un centre de stockage : Ce scénario consiste à réaliser une démarche multi-pick en amont et recourir à la livraison directe en aval. De plus, comme il existe un entrepôt qui supporte les stocks, on peut faire l'hypothèse que les livraisons en aval sont toujours en TL.

(G) Flux en trace directe en TL en passant par un centre de cross-docking : les trois derniers cas mobilisent un centre de transition sans stocks, en mettant en œuvre le principe du cross-docking (pour la définition voir le Chapitre 1). Dans le cas (G), sachant que dans cette étude nous faisons l'hypothèse que le taux de service hebdomadaire au distributeur ne doit pas

être remis en cause, il semble que cette proposition n'est pas réalisable sans avoir de stock intermédiaire, car les flux à la semaine dans la base de données ne sont pas toujours équivalant à un volume de TL. Donc cette solution ne sera pas étudiée dans ce travail doctoral.

(H) Flux en trace directe en LTL en passant par un centre de cross-docking : il s'agit du cas où les fournisseurs envoient indépendamment leurs flux au centre de cross-docking. Ces flux sont éclatés puis regroupés selon les demandes vers les PF. Comme le centre ne supporte pas de stock, les camions qui y entrent ou qui y sortent ne sont certainement pas complets.

(I) Livraison en tournée de véhicule en passant par un centre de cross-docking : cette solution est de fait une combinaison d'une approche multi-pick en amont pour servir le centre de cross-docking d'où partira des livraisons directes en aval. Le transport en amont et en aval n'est pas toujours en TL.

Parmi ces 9 possibilités, certains scénarios ne sont pas exploitables dans cette étude pour différentes raisons, par exemple le cas (G) n'est pas à retenir dans le contexte de cette étude car il remet en cause une exigence d'un des partenaires. De même le cas (E) qui pourrait éventuellement se transformer en cas (D) ou (H) ne peut pas être étudié car il demanderait des données supplémentaires au niveau de la planification industrielle de chaque fournisseur avec une expression du besoin à la référence produit, ce qui en l'état était impossible à obtenir de manière exhaustive. Bien que le cas (B) semble pouvoir offrir une bonne pratique pour maintenir le taux de service au distributeur, il aurait un impact négatif sur l'environnement et le coût du transport ce qui serait contraire aux objectifs de l'étude mandatée par la FEEF, ce cas de figure n'est donc pas pris en compte aussi. Enfin, en termes de transport, les cas (F) et (I) sont similaires, mais le premier est évidemment moins polluant en raison de l'hypothèse de transport en TL en aval, ce qui nous conduit à écarter le deuxième.

En conclusion, s'appuyant sur le premier objectif qui est de réduire les émissions de CO₂ du transport, nous avons choisi les cinq cas à tester, il s'agit des cas A, C, D, F, H. Ces scénarios d'optimisation sont numérotés dans le Tableau 6.4 et seront analysés dans cette étude. Le cas (A) qui ne mobilise pas un principe de mutualisation sera utilisé comme une référence de borne inférieure d'émissions.

Dans les paragraphes suivants, nous allons présenter la mutualisation dans ces différents scénarios.

6.2.4.1 Scénario 1 (Cas D) : Mutualisation d'entrepôts livrés en camions complets et directs

Par rapport au cas actuel, ce scénario propose un réseau logistique avec des centres de mutualisation et des livraisons directes en camions complets en amont et en aval, voir la Figure 6.6.

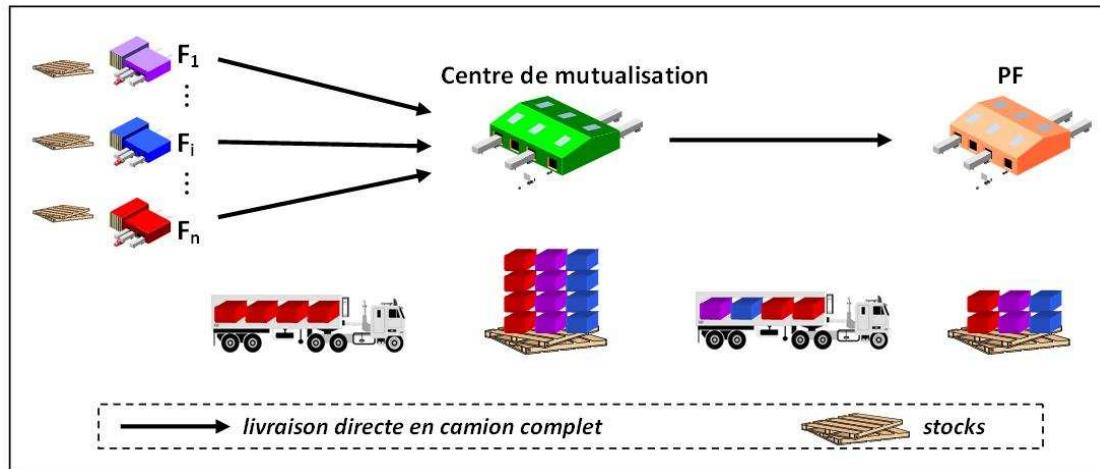


Figure 6.6 : Réseau logistique avec centre de mutualisation et livraison directe en camions complets dans l'amont et l'aval

Si l'on ne tient pas compte des contraintes opérationnelles, la meilleure façon de transporter tous ces flux avec le minimum d'émissions dues au transport serait le transport en camion complet direct du fournisseur au distributeur (le cas (A) dans le Tableau 6.4). Cependant, cette stratégie est rarement utilisée dans les PME car les commandes qu'ils reçoivent sont souvent largement inférieures au volume d'un camion complet. Théoriquement, la stratégie est en faveur du bilan écologique ou économique du transport, mais au prix de supporter un niveau de stock beaucoup plus élevé des deux côtés de la chaîne, fournisseur et distributeur. Selon des exemples dans la grande distribution (Harrison et Hoek, 2005) et (Dornier, 1997), la centralisation des stocks de différents fournisseurs peut être une piste pour améliorer la situation. Dans ce cas, on peut intercaler une plateforme entre les sites des fournisseurs et les plateformes du distributeur pour « absorber » les stocks.

En intégrant cette idée dans la mutualisation, le réseau logistique tel que présenté dans la Figure 6.6 est proposé. Nous faisons l'hypothèse que tous les fournisseurs expédient en

camions complets leurs marchandises aux centres de mutualisation (hubs) et que les plateformes du distributeur (PF) sont également approvisionnées en camions complets venus des hubs. Dans la mesure où toutes les livraisons sont en camions complets, c'est le scénario qui réduit considérablement les émissions du transport ainsi que le coût du transport.

Dans ce scénario, les fournisseurs livrent leurs produits finis aussitôt après la production pour déplacer tous les stocks au centre de mutualisation. Ainsi, les stocks sont absents sur le site de production. Cette hypothèse affecte les niveaux de stock au centre de mutualisation et aux plateformes de distribution en aval. Il est à noter que dans les figures, comme la Figure 6.6 et ainsi que les suivantes, la représentation du niveau des stocks est simplement une illustration de la situation, mais ne correspond pas à une valeur précise du niveau ni de sa variation.

De plus, cette organisation logistique induit un coût de passage par entrepôt. Le coût (en €palette) a été obtenu par le partenaire distributeur de cette étude, Carrefour, via une base de données qui recense au niveau national ces coûts. Cette valeur est une donnée moyenne constatée sur le territoire français, c'est pourquoi nous faisons l'hypothèse de l'uniformité de ce coût pour tous les sites de stockage du réseau logistique.

Sachant que ce scénario mobilise au moins un centre de mutualisation intermédiaire, le nombre et la localisation de ce(s) centre(s) sont des paramètres essentiels à préciser lors de la conception du réseau de distribution. Cela nous ramène à un problème de type *Location-Allocation Problem* discuté dans le chapitre de la modélisation, autrement dit le HMP (rappel : P -hub médiane Problème). Le problème particulier dans ce scénario est que le nombre de hubs P est à définir. Pour résoudre ce problème dans cette étude, nous avons procédé comme suit.

D'abord, comme les sites d'origine et de demande sont connus, il faut définir le cluster des candidats pour les hubs. D'après la répartition des sites des fournisseurs dans la Figure 6.4, 12 centres de mutualisation sont initialement proposés comme candidats dans la Figure 6.7. Les propositions de localisation de ces hubs ont été décidées selon deux critères, d'une part, en fonction de la densité des sites des fournisseurs et, d'autre part, l'existence de sites logistiques. En conséquence, 12 centres sont retenus comme l'ensemble des candidats à tester.

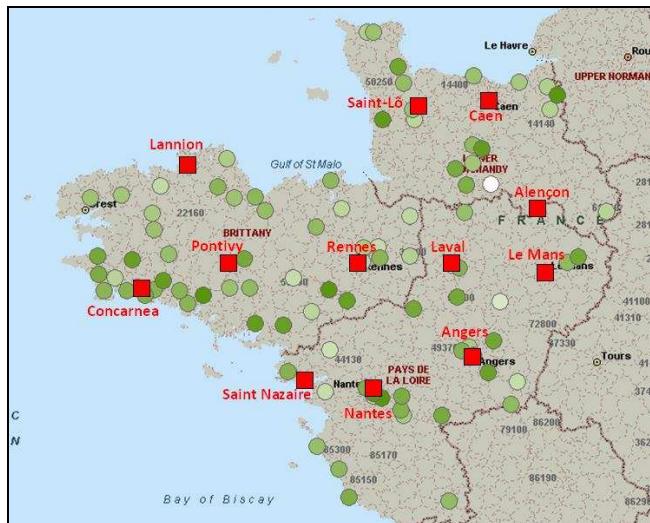


Figure 6.7 : Proposition des 12 candidats pour les centres de mutualisation

Une fois cette localisation obtenue nous pouvons construire un modèle d'optimisation qui a pour objectif de minimiser les émissions de CO₂, ainsi que le coût de transport, en fonction du nombre de centres de mutualisation. Le modèle est présenté ci-après.

Ressemblant au HMP traditionnel, le modèle construit cherche à définir un graphe $G = (N, A)$, où l'ensemble des nœuds $N = O \cup M \cup D$ (O : sites de fournisseurs ; M : hubs candidats ; D : plateformes du distributeur), et l'ensemble des arcs $A = O \times M \cup M \times D$. Comme cela, le modèle construit du chapitre 4 est utilisable pour formuler ce scénario, mais avec certaines modifications.

D'abord, comme le réseau à concevoir est à deux échelons, seulement les transports en amont et en aval sont pris en considération dans le modèle. En plus, en raison de l'hypothèse que les transports amont et aval sont tous en camion complet, la fonction d'émissions (ou du coût) de transport est rendue linéaire (les palettes dans le camion complet représentent proportionnellement la somme d'émissions du camion). Donc, on peut déterminer le facteur d'émissions $\alpha = E_{\text{plein}}/33 = 0,03321 \text{ kg CO}_2/\text{km-palette}$ (rappelons $E_{\text{plein}} = 1,096 \text{ kg/km}$), de même pour le facteur de coût de transport λ (en €/km-palette). Donc la fonction objectif et les contraintes concernées peuvent être simplifiées comme ci-dessous :

Fonction objectif :

$$\min CO_2: \sum_{t \in T} (\sum_{om \in A_u} \alpha x_{omt} d_{om} + \sum_{md \in A_d} \alpha x_{mdt} d_{md}) \quad 6.2$$

$$\text{Ou : } \min Coût: \sum_{t \in T} [\sum_{om \in A_u} (\lambda x_{omt} d_{om} + C_{in} x_{omt}) + \sum_{md \in A_d} (\lambda x_{mdt} d_{md} + C_{out} x_{mdt})] \quad 6.2'$$

Contraintes d'équilibre des flux:

$$x_{at} = \sum_{k \in K} x_{at}^k, \forall a \in A, \forall t \in T \quad 6.3$$

$$x_{at}^k \geq 0, \forall a \in A, \forall k \in K, \forall t \in T \quad 6.4$$

$$\sum_{m \in M} x_{omt}^k = R_{ot}^k, \forall o \in O, \forall k \in K, \forall t \in T \quad 6.5$$

$$\sum_{m \in M} x_{mdt}^k = B_{dt}^k, \forall d \in D, \forall k \in K, \forall t \in T \quad 6.6$$

$$\sum_{o \in O} x_{omt}^k = \sum_{d \in D} x_{mdt}^k, \forall k \in K, \forall m \in M, \forall t \in T \quad 6.7$$

Contraintes d'affectation des hubs:

$$p_{omt}^k \in \{0,1\}, \forall o \in O, \forall m \in M, \forall k \in K, \forall t \in T \quad 6.8$$

$$x_{omt}^k \leq p_{omt}^k \cdot Z, \forall o \in O, \forall m \in M, \forall k \in K, \forall t \in T \quad 6.9$$

$$\sum_{m \in M} p_{omt}^k = 1, \forall k \in K, \forall o \in O, \forall t \in T \quad 6.10$$

$$p_{omt}^k = p_{omt}^k, \forall o \in O, \forall m \in M, \forall k \in K, \forall t \in T \quad 6.11$$

Contraintes d'ouverture des hubs :

$$H_{mt} \in \{0,1\}, \forall m \in M \quad 6.12$$

$$\sum_{m \in M} H_{mt} = P, \forall t \in T \quad 6.13$$

$$x_{omt}^k \leq H_{mt} \cdot Z, \forall o \in O, \forall m \in M, \forall k \in K, \forall t \in T \quad 6.14$$

Avec :

Z : une constante grande ;

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

P : un nombre entier et $1 \leq P \leq 12$;

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

O, M, D : représentent respectivement, l'ensemble des sites des fournisseurs (WH), les candidats comme centres de mutualisation (HUB) et les plateformes du distributeur (PF);

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

a : arc élément et $a \in A$;

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

C_{in} et C_{out} : cout de passage de flux entrés et sortis par centres ;

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

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

x_{at} : somme de flux sur l'arc a à la semaine t ;

Les variables de décision de ce modèle d'optimisation sont :

x^k_{at} : quantité de flux de produit k sur l'arc a à la semaine t ;

p^k_{omt} : variable binaire avec $p^k_{omt}=1$ si le flux du produit k passe par l'arc $om \in A_u$ à la semaine t , sinon 0 ;

H_{mt} : variable binaire, vaut 1 si le hub $m \in M$ est ouvert à la semaine t , sinon 0 ;

L'optimisation peut s'opérer aussi bien au niveau écologique qu'économique. Cela consiste à comparer les résultats écologiques et économiques afin d'examiner s'ils sont en contradiction. De fait, l'optimisation des émissions ou du coût du transport est associée à deux modèles. Sachant que leurs contraintes sont identiques et que la différence se situe uniquement au niveau de la fonction objectif, les deux modèles sont présentés en même temps. Les fonctions objectif (6.2) et (6.2') ont respectivement pour objectif de minimiser les émissions de CO₂ et le coût de transport en amont et en aval des centres de mutualisation. Spécialement, le coût de transport comprend aussi le coût de passage des flux par chaque centre. Les contraintes (6.3)-(6.7) sont des contraintes classiques de conservation des flux dans le réseau en satisfaisant aux demandes. Les contraintes (6.8)-(6.9) assurent que les flux en amont sont tous massifiés dans des centres de mutualisation. De plus, les contraintes (6.10)-(6.11) garantissent que chaque fournisseur ne livre qu'un centre et toujours le même sur l'horizon des 33 semaines. Avec les contraintes (6.12)-(6.13), on peut faire varier la valeur de P (de 1 à 12) du nombre de hubs afin d'obtenir des résultats d'optimisation différents et pouvoir juger de la sensibilité du modèle à cette variable. La contrainte (6.14) garantit qu'aucun flux ne passe pas par les centres qui ne sont pas ouverts.

A travers le modèle, ce scénario s'apparente à un problème de transport du réseau de distribution à deux échelons, multi-produits et multi-périodes (33 semaines). Ce problème d'optimisation correspond à de la PLNE (Programmation Linéaire en Nombres Entiers) avec une fonction objectif linéaire.

Afin de déterminer le nombre optimum des hubs et les localiser, on peut faire varier le P dans la contrainte (6.13), puis comparer les résultats d'optimisation comme suit.

La Figure 6.8 montre les résultats de l'optimisation des émissions de CO₂ ou du coût de transport du scénario 1 lorsque le nombre de hubs P varie avec la même base de données.

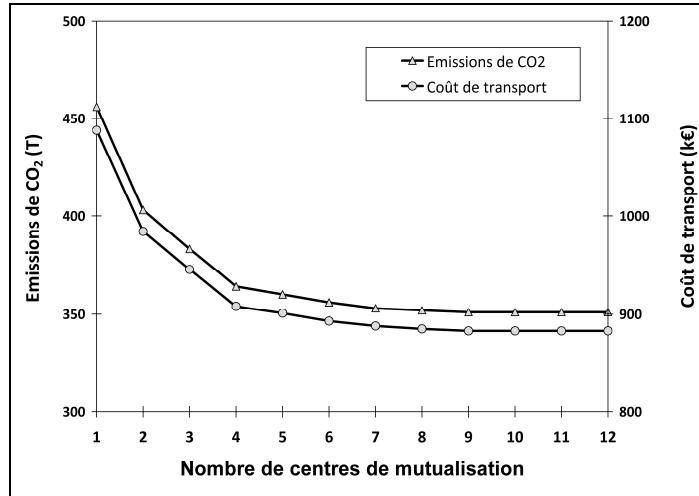


Figure 6.8 : Emissions de CO₂ et coût du transport par rapport au nombre de centres de mutualisation (Scénario 1 à 33 semaines)

L'augmentation du nombre de hubs conduit les deux courbes à descendre au même rythme et à tendre vers une asymptote, ceci explique par le fait que les émissions ou le coût du transport évoluent de façon similaire lorsque la distance entre WH/DC et hubs diminue. En effet, plus il y a de hubs dans la région, plus la distance depuis les WH vers les DC via les hubs est courte.

Toutefois, on pourra remarquer que la pente des courbes dans la figure 5.8 ne correspond pas à la conclusion des travaux de Chopra qui porte sur le même problème, voir (Chopra, 2003) et (Chopra et Meindl, 2004), p.75. Il révèle que la courbe devra remonter quand le nombre de hub N est assez grand, car l'effet de consolidation de fret au niveau du transport est dégradé si le fournisseur livre plus de hubs. Dans ce contexte, le transport entrant des hubs n'est pas en TL et ainsi le coût de transport augmente. Il existe deux facteurs qui expliquent cette différence. D'abord, particulièrement dans ce cas-ci, nous avons fait l'hypothèse que les transports entrants et sortants des hubs sont en TL, donc la distance parcourue est la seule qui a un impact sur les émissions ou le coût du transport. En outre, la raison la plus importante est que la minimisation des émissions, ou du coût du transport est le seul objectif du modèle. Il est assez évident que plus il y a de hubs, plus les possibilités de regroupement des flux

existent. C'est donc un impact positif pour la massification de flux. C'est la raison pour laquelle les deux courbes tendent toujours à descendre lors de l'augmentation du nombre de hubs.

Par contre, la situation peut être différente si l'on prend en compte les émissions ou le coût d'ouverture des hubs. Dans ce cas-là, chaque ouverture de hub contribue à augmenter les émissions liées au site et au coût d'implantation. Donc les courbes dans la figure peuvent probablement remonter lorsque le nombre de hubs P est grand. C'est la raison pour laquelle nous ne pensons pas installer 12 hubs dans la région, même si cette stratégie offre la meilleure solution.

S'appuyant sur les résultats de la Figure 6.8, on peut constater que la solution avec quatre hubs, $P=4$, semble être le meilleur compromis pour réduire les émissions et le coût dû au transport par rapport au nombre de hubs. Donc c'est le résultat retenu pour ce cas.

Néanmoins, il faut noter que l'optimisation économique ou écologique ne conduit pas forcément à l'ouverture des mêmes hubs. Dans ce cas d'étude il se trouve que, de façon « accidentelle », les deux optimisations (émissions ou coût de transport) convergent exactement vers les mêmes 4 centres, comme le montre la Figure 6.9, il s'agit de Rennes (35000), Nantes (44000), Saint-Lô (50000) et Le Mans (72000). De plus, les hubs localisés par le modèle sont proches des plateformes de distribution dans cet exemple.

Dans ce cas précis on pourrait même imaginer que ces locaux se regroupent sous de même (plateforme distributeur et entrepôt industriel).

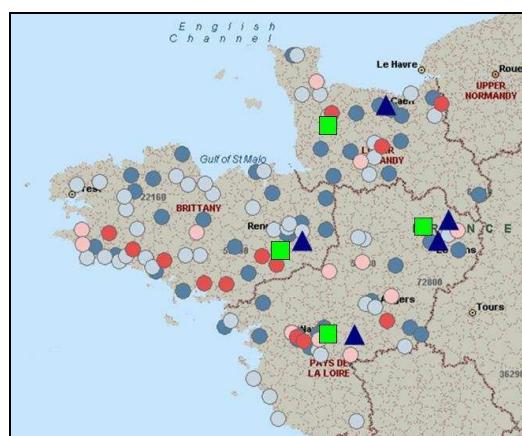


Figure 6.9 : Exemple d'implantation optimisée pour 4 entrepôts (optimisation des émissions du scénario 1)

Les résultats quantitatifs pour tous les scénarios seront présentés de façon conjointe dans la partie 6.3. Nous allons maintenant détailler le cas H qui mobilise un centre de cross docking.

6.2.4.2 Scénario 2 (Cas H) : Mutualisation par des centres de Cross-docking

Comme le montre la Figure 6.10, ce scénario mobilise un réseau logistique où les centres de mutualisation sont opérés en cross docking (CDM pour Centre de cross-Docking Mutualisé dans la figure), appelé « centre de groupage/dégroupage » en amont par le distributeur. La logique Cross-Docking est appliquée sous la contrainte, non remise en cause, du taux de service à la semaine. Cela signifie que les transports réalisés en amont et en aval ne sont plus systématiquement réalisés en camions complets puisque les stocks au centre intermédiaire ne sont pas autorisés dans cette logique de tension des flux.

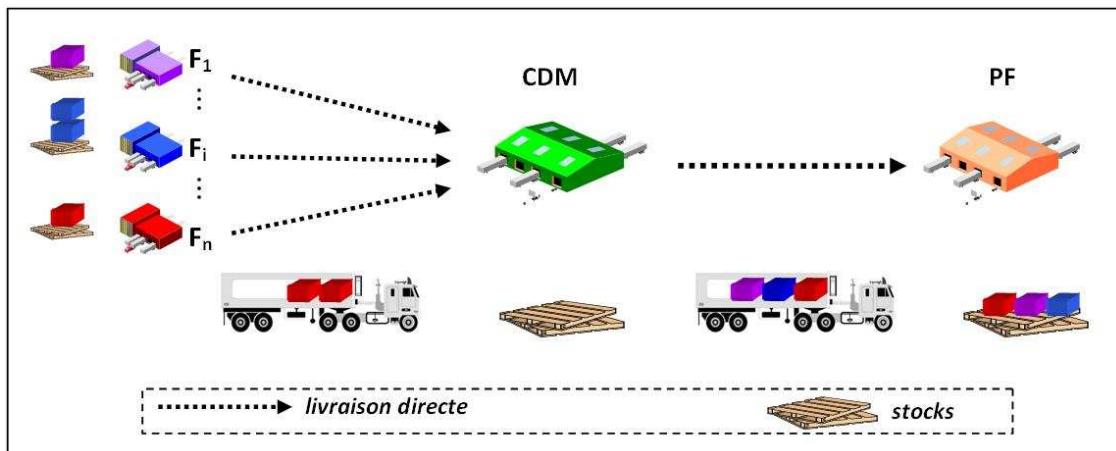


Figure 6.10 : Place des centres de Cross-Docking Mutualisés

Même si le concept de cross-docking n'est pas récent, les expériences recueillies sur la plateforme du distributeur ont montré que seulement 10% à 20% sur des flux sont traités selon ce principe. De plus, ces flux sont souvent transportés avec d'autres dans un même camion.

Puisque ce scénario modélise des transports qui ne sont plus toujours en TL, par rapport au scénario précédent, il est fort probable que les émissions et le coût de transport seront plus élevés. Néanmoins, sachant que le principe de cross-docking a pour but d'accélérer la rotation des marchandises et ainsi de faire baisser les niveaux de stocks dans toute la chaîne, il est prévisible que le coût de stock diminue à terme.

Il existe également un coût de passage, autrement dit un coût de transfert des flux aux CDM en unité de €/palette. Ce coût que est identique dans chaque CDM et a été communiqué

par les partenaires du projet selon leur point de vue métier. De plus, nous supposons que, contrairement au premier scénario S1 où il y a un coût différent d'entrée et de sortie à la palette, le C_{in} et C_{out} dans la (6.2'), le coût de transfert de flux en Cross-docking prend une seule valeur, car il correspond au coût d'éclatement et de préparation des palettes en même temps dans la zone d'expédition des palettes. Par contre, la difficulté est que l'on ne connaît pas a priori quel est le taux de palettes à éclater sur la totalité du flux. En effet, cela dépend essentiellement de la capacité de pré-allotissement des commandes du côté des fournisseurs. En conséquence, nous ne pouvons que prendre en compte un coût minimum et un coût maximum qui correspondent respectivement à l'hypothèse de 0% ou 100% de palettes à éclater sur la plateforme de Cross-docking. Ces deux valeurs produisent des résultats différents, voir la partie des résultats 6.3.

Comme dans le scénario précédent, le Scénario2 intègre aussi des centres de mutualisation intermédiaires. Donc il faut également en déterminer le nombre optimum et la localisation dans le réseau. A cette fin, nous reprenons la même méthode que celle utilisée dans l'étude du premier cas S1, c'est-à-dire que les 12 centres candidats sont retenus. Nous allons donc présenter ce nouveau modèle d'optimisation selon les hypothèses que nous venons d'énoncer.

Si l'on compare la forme du réseau du scénario 1 à celle de ce scénario noté 2, on trouve que les deux sont quasi identiques puisque les éléments dans le graphe $G = (N, A)$ sont similaires. Nous pouvons donc reprendre le modèle d'optimisation du S1. Mais la différence se situe évidemment sur les transports qui ne sont plus en TL dans ce nouveau cas. Il faut simplement reformuler la fonction d'émissions et de coût de transport.

Si le transport n'est pas toujours en TL, la fonction d'émissions de CO₂ et de coût de transport reprend la forme linéaire par morceaux discontinu. La Figure 6.11 illustre la définition de chaque segment. De là, nous pouvons utiliser la fonction linéaire par morceaux et les contraintes établies dans le paragraphe de la modélisation au modèle du S1 comme suit :

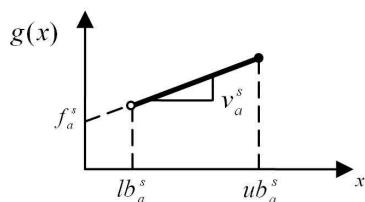


Figure 6.11 : Définition des paramètres de la fonction linéaire par morceaux $g(x)$

Fonction objectif :

$$\min CO_2 : \sum_{t \in T} \left(\sum_{om \in A_u} d_{om} \varepsilon(x_{omt}) + \sum_{md \in A_d} d_{md} \varepsilon(x_{mdt}) \right) \quad 6.15$$

$$\text{Ou : } \min Coût : \sum_{t \in T} \left[\sum_{om \in A_u} (d_{om} \xi(x_{omt}) + C_{in} x_{omt}) + \sum_{md \in A_d} (d_{md} \xi(x_{mdt}) + C_{out} x_{mdt}) \right] \quad 6.15'$$

Avec la fonction linéaire par morceaux :

$$g(x_{at}) = f_a^s y_a^s + v_a^s z_{at}^s \quad 6.16$$

Contraintes de linéarité par morceaux :

$$x_{at} = \sum_{s \in S_a} z_{at}^s ; \quad \forall a \in A, \forall t \in T \quad 6.17$$

$$x_{at} = \sum_{k \in K} x_{at}^k , \quad \forall a \in A, \forall t \in T \quad 6.18$$

$$lb_a^s y_a^s \leq z_{at}^s \leq ub_a^s y_a^s , \quad \forall a \in A, \forall s \in S_a, \forall t \in T \quad 6.19$$

$$\sum_{s \in S_a} y_a^s \leq 1 , \quad \forall a \in A \quad 6.20$$

$$y_a^s \in \{0,1\} , \quad \forall a \in A, \forall s \in S_a \quad 6.21$$

Avec :

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

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

f_a^s : valeur fixée et non négative de l'intersection du segment s sur l'arc a . Au niveau de la fonction d'émissions, elle égale les émissions de CO_2 d'un moyen de transport parcouru à vide. Sachant que les segments sont parallèles et identiquement décalés en fonction du nombre de camions, par exemple avec $E_{vide}=0,772$ kg/km, on a $f_a^1=0,772, f_a^2=1,544, \dots$ et $f_a^s=0,772*s$. Au niveau du coût de transport, elle représente le coût fixe de l'utilisation d'un

camion. En plus, ces intersections sont identiques pour tous les arcs, voir la partie de la modélisation des émissions au Chapitre 1 ;

v^s_a : pente du segment s sur l'arc a , qui est identique pour tous les arcs et tous les segments, avec $v^s_a=0,00982$ identique pour tous les segments en transport routier ;

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

lb^s_a et ub^s_a : borne inférieure et supérieure du flux total du segment s sur l'arc a . En particulier pour chaque arc a on suppose que $lb^1_a=0$ et $ub^{max}_a=+\infty$; et également que pour chaque segment s , $ub^s_a-lb^s_a=W_c$ qui représente la capacité du moyen de transport ;

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

La modélisation présentée ci-dessus est simplement la fonction d'émissions et de coût de transport linéaire par morceaux à intégrer dans le modèle d'optimisation présenté dans le scénario S1. Autrement dit, la fonction objectif qui était purement linéaire du S1 va être remplacée par la fonction (6.16) qui est linéaire par morceaux. De plus, en maintenant les autres contraintes, il faut ajouter les contraintes supplémentaires (6.17)-(6.20) dans le modèle.

Une fois que la construction du modèle finie, on peut tester la performance des schémas mutualisés par CDM. Vu la complexité du problème qui porte sur la conception de réseau à deux échelons, multi-produits et multi-périodes, plus la difficulté sur la fonction linéaire par morceaux, deux démarches de simplification sont nécessaires :

a. En matière de problème d'optimisation de la fonction linéaire par morceaux, la continuité, le nombre de segments et la convexité de la fonction influent fortement sur le temps de calcul, (Marins et al., 1997), (Croxton et al., 2007) et (Kameshwaran et Narahari, 2007). De ce fait, il est fait l'hypothèse que tous les camions sont complets au-delà d'un volume représentant 2 camions (soit 66 palettes) par livraison. Par conséquent, le nombre de segments est limité à 3, $S_a = 3$ et $s = \{1,2,3\}$, voir la Figure 6.12. De même, l'intersection du segment 3 est $f^3_a = 0$ la pente du segment est $v^3_a = 0,3321$ en termes des émissions de camion. La situation est similaire pour la fonction du coût de transport.

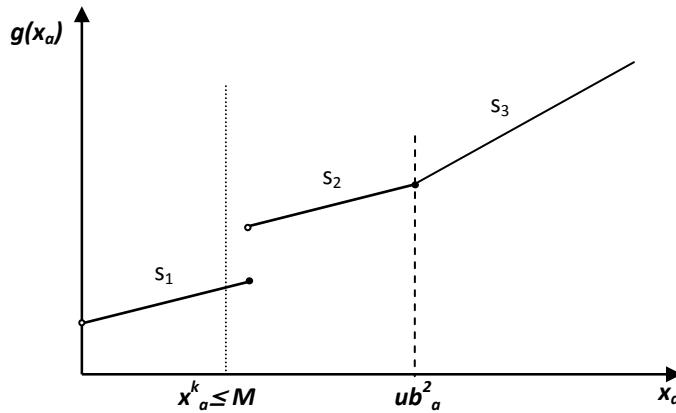


Figure 6.12 : Illustration de la réduction du nombre des segments de la fonction linéaire discontinue et des bornes sur la taille de flux

Dans cette étude, cette démarche d'approximation a un impact marginal sur le résultat de l'optimisation, car cette étude ne concerne que des PME qui livrent de faibles volumes. De fait, selon les résultats d'optimisation, la plupart des flux dans le réseau sont inférieurs au volume équivalent à 2 camions complets.

b. Selon la discussion sur la formulation de la fonction linéaire par morceaux dans le chapitre de la modélisation, nous pouvons utiliser le modèle renforcé proposé dans (Croxton et al., 2003b) et (Croxton et al., 2007) pour améliorer le modèle d'optimisation. Donc il faut intégrer les deux contraintes suivantes dans le modèle ci-dessus :

$$x_{omt}^k \leq R_{ot}^k \sum_s y_{om}^s, \quad o \in O, m \in M, k \in K, t \in T \quad 6.22$$

$$x_{mdt}^k \leq B_{dt}^k \sum_s y_{md}^s, \quad d \in D, m \in M, k \in K, t \in T \quad 6.23$$

Avec ces deux contraintes, la taille de flux du produit k est limitée par la valeur R_o^k ou B_d^k qui est présentée par M dans la Figure 6.12. En conséquence, la relaxation de PL est serrée et le temps de calcul est ainsi réduit.

Ces deux démarches de simplification sont très importantes dans cette étude, car elles permettent de réduire considérablement le temps de calcul lors de l'optimisation. Le problème de la localisation des hubs avec l'ensemble des flux sur les 33 semaines est donc très difficile à résoudre en raison de la taille du problème, notamment quand le nombre de hub P est grand (rappelons $1 \leq P \leq 12$). C'est pourquoi, l'optimisation du scénario S2 a été réalisée en deux phases. La première étape permet d'obtenir le nombre optimum et la localisation des CDM

pour concevoir le réseau avec les flux d'une semaine. La deuxième étape conduit à déterminer les schémas mutualisés et optimisés dans le réseau conçu avec les flux des 33 semaines. De ce fait, le résultat de la première étape sur l'étude de sensibilité du nombre de CDM sur la performance logistique du réseau va être abordé au prochain paragraphe.

L'idée de cette étude de sensibilité est conforme à celle qui a été menée au niveau du scénario S1, c'est-à-dire déterminer l'optimum en quantité et en localisation des CDM dans la région considérée. Pourtant, cette fois-ci avec la fonction linéaire par morceaux à minimiser, le problème d'optimisation est largement plus complexe que celui dans le premier scénario. Lors du lancement du modèle codé via ILOG OPL 6.3, il s'est vite avéré qu'il était très difficile de traiter l'ensemble des données des 33 semaines (plus de 200 000 variables pour ce problème de type PLNE). Pour cette raison, nous avons été obligés de chercher une solution pour réduire la complexité du problème. Deux démarches sont possibles, décomposer le flux par catégorie ou réduire l'horizon de temps. La première consiste à segmenter le problème en plusieurs sous-problèmes en fonction de la caractéristique des flux. Cette méthode est très limitée dans cette étude, car les flux retenus dans la base de données sont déjà assez homogènes. En conséquence, la « simplification » basée sur la réduction de l'horizon temporel semble plus adaptée. Au lieu de traiter les flux des 33 semaines conjointement, on prend la valeur moyenne à la semaine des flux par fournisseur. Donc, le problème d'origine multi-périodes se simplifie en un problème mono-période.

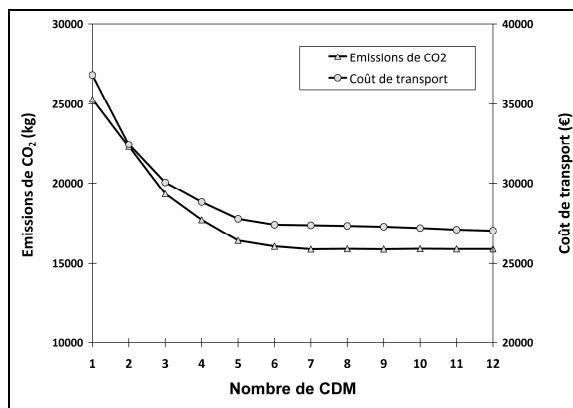


Figure 6.13 : Emissions de CO₂ et coût du transport par rapport au nombre de CDM (1 semaine)

Les résultats de l'optimisation économique et écologique ressemblent à ceux du S1, voir la Figure 6.13. Par contre, les résultats du S2 font apparaître que le réseau avec cinq, voire six CDM est le meilleur compromis entre le nombre de centres et la performance du transport. Néanmoins, pour que les scénarios soient comparables, le réseau du S2 est également

construit en se basant sur quatre CDM. D'ailleurs, la localisation des 4 centres est différente lors de l'optimisation sur les émissions ou sur les coûts (transport plus passage). Par exemple, les schémas « verts » sont avec les CDM localisés à Caen (14000), Rennes (35000), Angers (44000) et Pontivy (56300), par rapport au coût de transport optimisé avec Caen (14000), Rennes (35000), Nantes (44000) et Le Mans (72000).

Après avoir implanté les CDM, le réseau mutualisé est alors conçu. La prochaine étape est alors de définir les schémas mutualisés selon les critères d'optimisation en CO₂ ou en coût de transport. D'ailleurs, une fois que les CDM sont déterminés, le groupe des contraintes d'ouverture des hubs n'est plus nécessaire dans le modèle d'optimisation. Donc le modèle peut être simplifié et cela permet de réduire la complexité du problème. De ce fait, il est possible de faire l'optimisation sur l'ensemble des flux des 33 semaines. Les résultats sont exposés dans la partie 6.3.

6.2.4.3 Scénario 3 (Cas F) : Mutualisation d'entrepôts livrés par tournées et flux directs en TL

Dans ce scénario, le transport en amont se rapporte à des tournées de collecte. Pour se faire, tous les sites des fournisseurs, à savoir les points de départ en amont, sont affectés au plus proche centre de mutualisation où les flux sont consolidés. Ensuite, pour respecter les contraintes capacitaires des moyens de transport et simplifier le problème, nous faisons l'hypothèse que les flux des fournisseurs supérieurs à 33 palettes par livraison sont séparés en deux parties, l'une est traitée comme une livraison directe en camion complet ; et l'autre partie est un volume résiduel candidat à une collecte. Cette stratégie est similaire à l'étude (Bertazzi et al., 1997) portant sur l'idée de diviser un envoi en plusieurs parties qui pourraient être livrées selon différentes fréquences. Cette démarche a pour objectif de mieux remplir le moyen de transport. D'ailleurs, puisque les centres de mutualisation peuvent absorber les stocks des fournisseurs et du distributeur, on peut faire l'hypothèse que les flux en aval (depuis les centres mutualisés vers les plateformes du distributeur) sont livrés en camions complets comme le montre la Figure 6.14.

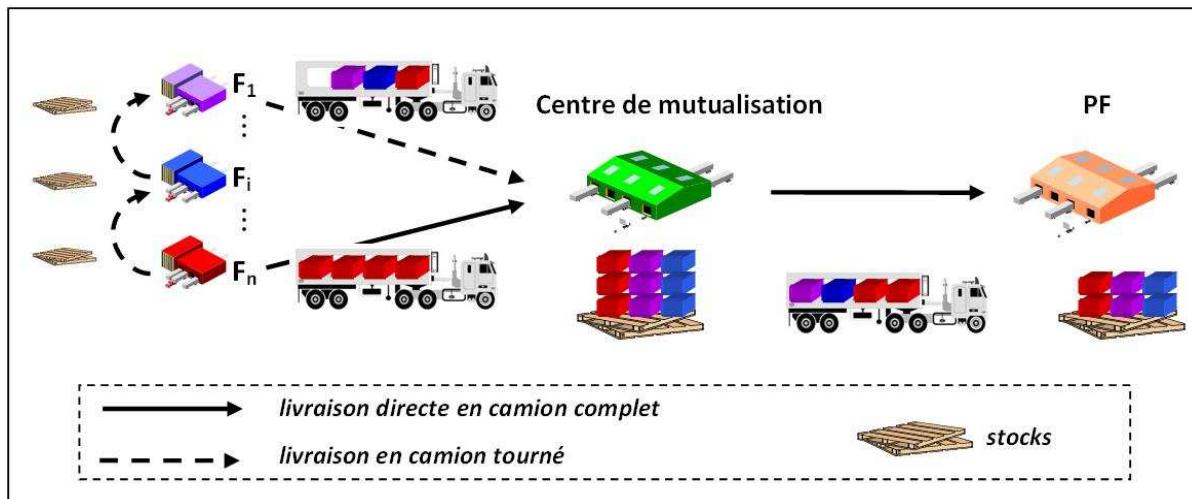


Figure 6.14 : Entrepôt mutualisé servi par livraisons directes et tournées

Les deux scénarios analysés auparavant sont tous basés sur des transports directs dans le réseau. Il serait donc intéressant de tester la contribution éventuelle d'une organisation de transport à la mutualisation, à savoir le transport en tournée de livraison. C'est pour cette raison que nous abordons les scénarios S3 et S4 en appliquant le transport en tournée de livraison dans le réseau mutualisé. Cette stratégie de tournées conduit à une mutualisation au niveau des moyens de transport pour plusieurs donneurs d'ordre du réseau.

De la même façon que les deux scénarios précédents, le scénario 3 utilise aussi les centres de mutualisation pour réaliser la mutualisation et, donc, il faut déterminer les centres dans le réseau de ce scénario. Si l'on compare le S1 et le S3, on trouve que tous les flux sont livrés en TL direct pour les deux scénarios, sauf la partie en tournées en amont du S3. C'est pour cette raison que nous reprenons la solution d'implantation de centre développée dans le premier pour l'appliquer à ce scénario.

De fait, il est vrai que cette solution n'est pas forcément la meilleure pour la localisation des hubs puisqu'elle ne prend pas en considération l'impact de localisation des hubs sur les tournées. Associer le VRP (*Vehicle Routing Problem*) au FLP (*Facility Location Problem*), est un sujet de recherche qui existe depuis les années 80, à savoir le LRP (*Location-Routing Problem*). Il vise à optimiser simultanément les schémas logistiques à deux niveaux de décision : la localisation de dépôts et la définition des tournées. Ce sujet est largement étudié dans une thèse (Prodhon, 2006), voir aussi (Tuzun et Burke, 1999) et (Ambrosino et Grazia Scutella, 2005). Mais, malheureusement, les modèles proposés ne sont pas tout à fait adaptables à notre cas d'étude. En effet, le LRP n'étudie que l'interdépendance des tournées

et la localisation des dépôts, mais la partie du flux en TL direct n'est pas abordée, alors que dans notre étude elle est importante. La recherche bibliographique menée dans le domaine LRP ne nous a pas permis d'identifier un modèle qui traite simultanément le LRP et le transport direct en TL dans le même réseau de distribution. Deuxièmement, vu la complexité du problème portant sur 12 candidats pour les dépôts et près de 160 points à visiter, on est conscient qu'il serait très difficile de réaliser une optimisation pour ce problème qui est de type NP-difficile. C'est pourquoi dans ce scénario le FLP et le VRP ne sont pas résolus simultanément. De plus, pour les mêmes raisons, les sites des fournisseurs sont directement associés au hub le plus proche. Il s'agit d'une stratégie *zone-first route-second* pour décomposer le problème.

Au niveau des émissions et du coût de transport, la partie en amont peut être calculée selon deux démarches, la première pour la somme des émissions ou du coût généré par les livraisons directes en TL et la deuxième concernant les trajets des tournées. La partie des émissions ou du coût en aval correspond à un seul type de transport en TL direct. De plus, il faut ajouter le coût de passage des flux par les hubs (idem à S1) et le coût de stop en tournées (en €/arrêt).

Quant au stock, par analogie avec le scénario 1, la plupart de stocks du réseau S3 sont localisés dans les centres de mutualisation.

Il existe a priori deux types de flux dans ce scénario, direct et en tournée. Pour la partie des flux en TL direct, comme les sites des fournisseurs sont systématiquement associés au hub plus le proche et que chaque site ne livre qu'un seul hub, les schémas logistiques pour ces flux directs sont alors définis. Maintenant, il faut modéliser le problème d'optimisation de tournées en amont.

Comme nous l'avons montré dans le chapitre 4, le PTV (Problème de Tournée de Véhicules) peut être dévisé en plusieurs sous-problèmes en fonction des contraintes prises en compte. Dans le S3 et le prochain scénario S4, nous cherchons à tester la performance du principe de la mutualisation au niveau des moyens de transport qui consiste à améliorer l'utilisation de ces moyens. La capacité du moyen est donc un facteur important à considérer. En conséquence, il s'agit d'un problème de type CVRP (*Capacitated Vehicle Routing Problem*). D'ailleurs, sachant que le taux de service au distributeur est calculé à la semaine dans cette étude, nous faisons l'hypothèse que la contrainte sur le temps de transport est

négligeable (sans *Time Windows*). De plus, comme nous l'avons déjà mentionné, les trajets retour ne sont pas considérés. Donc, le problème à résoudre pour ce scénario S3 est de type CVRP.

Le problème CVRP, notamment ayant pour objectif de minimiser le CO₂ du transport, a été déjà discuté dans le chapitre de la modélisation. Il s'avère que la minimisation des émissions de CO₂ des tournées est rarement discutée dans le cadre du CVRP. Seulement deux études (Palmer, 2007) et (Ubeda et al., 2010) proposent une méthode heuristique qui cherche les schémas les moins polluants lors de la planification des tournées. Or, cette méthode offre des résultats comparables sur la minimisation des émissions avec les méthodes exactes qui minimisent les distances parcourues. Dans ce contexte, nous proposons d'utiliser les méthodes classiques qui minimisent les distances pour modéliser le CVRP de ce scénario S3.

Comme le montre le chapitre sur la modélisation, le CVRP est traditionnellement formulé par sous la forme de PLNE, voir (Toth et Vigo, 2002), (Guéret et al., 2002) et (Kara et al., 2004). C'est pourquoi, nous proposons de formuler le problème de ce scénario comme suit :

$$\min \sum_{i \neq j} d_{ij} x_{ij} \quad 6.24$$

$$\text{Sujet à : } \sum_{j=2}^n x_{1j} = m ; \quad 6.25$$

$$\sum_{i=2}^n x_{i1} = m \quad 6.26$$

$$\sum_{j=1; j \neq i}^n x_{ij} = 1 \quad (i=2, \dots, n) \quad 6.27$$

$$\sum_{i=1; i \neq i}^n x_{ij} = 1 \quad (j=2, \dots, n) \quad 6.28$$

$$q_i \leq u_i \leq Q \quad (i=2, \dots, n) \quad 6.29$$

$$u_i \leq Q + (q_i - Q)x_{1i} \quad (i=2, \dots, n); \quad 6.30$$

$$u_i - u_j + Qx_{ij} + (Q - q_i - q_j)x_{ji} \leq Q - q_j \quad (i, j=2, \dots, n; i \neq j); \quad 6.31$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad (i, j=1, \dots, n; i \neq j) \quad 6.32$$

$$u_i \geq 0 \quad (i=2, \dots, n) \quad 6.33$$

Ce modèle a pour but d'optimiser les trajets en tournée portant sur la totalité des distances parcourues pour le collectage. De plus, il est nécessaire de respecter la capacité des véhicules. De ce fait, il modélise le CVRP par de la PLNE qui est un autre problème NP-difficile. En considérant que toutes les demandes à la semaine doivent être satisfaites, les tournées sont indépendantes d'une semaine à l'autre. Ainsi, c'est une optimisation en mono-période.

Les variables et les contraintes dans le modèle ci-dessus ont été déjà illustrées et expliquées dans le chapitre sur la modélisation, on pourra s'y référer pour leur validation. Néanmoins, une contrainte supplémentaire est imposée dans le modèle pour améliorer l'optimisation.

En effet, le temps de calcul pour un problème de type CVRP croît de façon exponentielle avec le nombre de points de ramasse (Toth et Vigo, 2002). Afin de réduire la complexité du

problème, nous décomposons le réseau logistique par la zone première-route seconde. C'est-à-dire que les entrepôts des fournisseurs sont associés à un et un seul centre de mutualisation considéré comme le plus proche. Les flux en amont sont maintenant traités par centre. Cependant, il y a en moyenne plus de 20 points potentiels de ramasse par centre et par semaine, cela nous conduit à imposer une contrainte de plus (6.34).

$$d_{ij}x_{ij} \leq D \quad (i, j=2, \dots, n; i \neq j); \quad 6.34$$

Cette contrainte a pour but de limiter la distance entre deux points de ramasse. Cette contrainte réduit considérablement le temps de calcul. Dans notre étude, le modèle (6.21-30) résolu par le solveur CPLEX offre une convergence très lente entre la solution d'optimisation obtenue et l'objectif optimal de la PL : environ quelques jours de calcul pour un gap de 30 à 40%. La situation s'améliore nettement si l'on introduit la contrainte (6.34). Il est possible d'obtenir une solution avec un gap de moins de 3% en 30 minutes environ. Par contre, le temps de calcul et la qualité de l'optimisation sont sensibles à la valeur choisie pour D. Une étude de sensibilité complémentaire a montré que D=50km est le meilleur compromis.

Enfin, il est assez évident que le modèle ainsi développé pour ce scénario ne minimise pas directement les émissions de CO₂ mais la distance parcourue. A ce niveau, l'impact du chargement sur chaque segment de tournées n'est pas pris en compte dans la minimisation. Le sens de ramasse préférable pour les émissions est ensuite adapté. La stratégie est donc : route en premier et puis chargement.

Comme le critère choisi minimise la distance et non directement les émissions du transport, il s'agit d'une limite de ce scénario. Néanmoins, l'optimisation des distances parcourues est également une optimisation des émissions et du coût de transport en raison de leur forte corrélation, voir les résultats identiques dans (Palmer, 2007) et (Ubeda et al., 2010). De plus, l'objectif de CVRP est de minimiser la distance en maximisant le taux d'utilisation de véhicule, donc il conduit généralement à impacter positivement le chargement du moyen de transport, ainsi que la réduction des émissions (McKinnon, 2000).

6.2.4.4 Scénario 4 (Cas C) : Mutualisation par des tournées de camions

Ce scénario noté S4 consiste à mutualiser des moyens de transport sans avoir un centre de mutualisation intermédiaire. Toutes les livraisons se font directement depuis les fournisseurs vers les plateformes du distributeur, voir Figure 6.15.

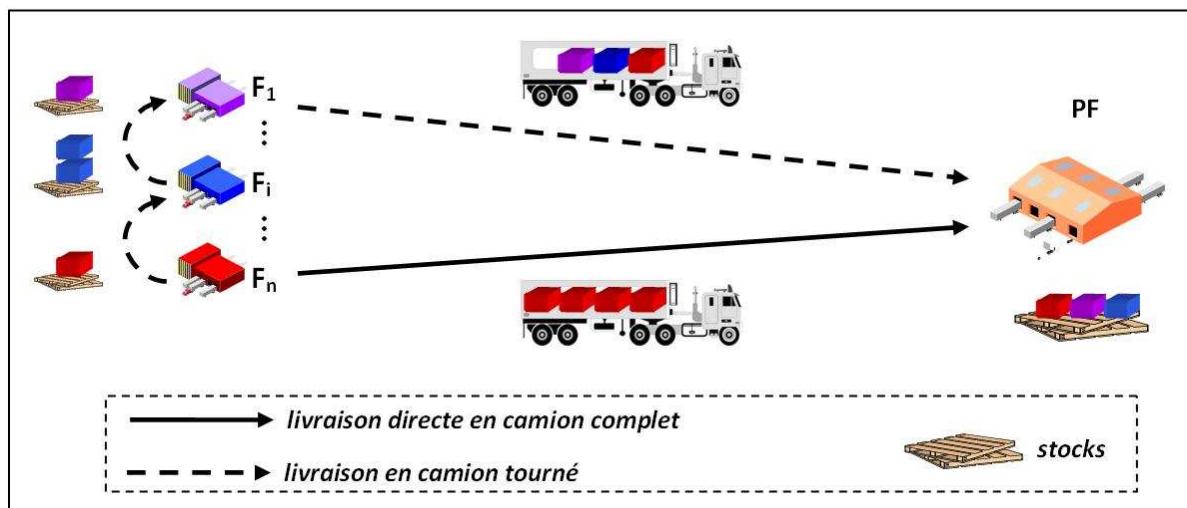


Figure 6.15 : Mutualisation de moyen de transport

Par rapport aux 3 scénarios étudiés précédemment, l'intérêt de ce scénario réside dans l'absence de centre intermédiaire. De ce fait, des économies au niveau des émissions et des coûts logistiques des centres sont réalisées même si elles ne sont pas considérées dans cette étude. En revanche, les flux sont mutualisés uniquement au niveau du moyen de transport.

La méthode de calcul des émissions et du coût de transport est identique à celle qui a été développée pour la partie amont du scénario 3.

Quant aux stocks, ils se situent sur les sites des fournisseurs et sur les plateformes du distributeur.

Ce scénario est le seul qui ne comprend aucun centre intermédiaire, de sorte qu'il n'intègre pas de coût de passage des flux par une plateforme intermédiaire, mais uniquement le coût de transfert par plateforme, à savoir le coût d'arrêt du véhicule durant la tournée.

La stratégie de ramasse par tournées est identique à celle du troisième scénario. En conséquence, le modèle du scénario précédent est aussi adapté dans ce cas, ainsi que les contraintes, à savoir de (6.24) à (6.34).

D'ailleurs, selon l'hypothèse que les plateformes sont indépendantes (donc pas de multi-livraison), les flux d'un fournisseur peuvent être éventuellement séparés en n parties lorsque les produits du fournisseur sont demandés par n plateformes. En conséquence, le nombre de variables en matière de CVRP est considérablement plus grand que pour le scénario S3 et le problème est alors plus complexe.

6.3 Résultats et discussions

Cette section est consacrée à la présentation et la discussion des résultats obtenus. Il illustre d'abord les résultats selon les deux dimensions pertinentes de cette étude : environnementale et économique.

6.3.1 Dimension environnementale

Les résultats environnementaux sont basés sur l'optimisation des émissions de CO₂ liées au transport, car il s'agit de la seule composante environnementale à cette étape du travail, comme défini au début. Sur les trois premiers scénarios d'optimisation, les émissions se composent de deux parties par rapport au transport amont et aval. Le scénario 4 ne comprend que la somme des émissions en raison de la non-utilisation d'un centre intermédiaire.

Emissions de CO ₂ (Tonne)	S0	Mini	S1	S2	S3	S4
Transport amont (ou tournée)	646	-	185	247	186	537
Transport aval (ou direct)	-	330	179	277	240	-
Somme	646	330	364	524	426	537

Tableau 6.5 : Résultats environnementaux (somme des émissions de CO₂ de transport de 33 semaines)

Le Tableau 6.5 synthétise les résultats de tous les scénarios étudiés, en introduisant le cas S0 correspondant à la situation actuelle et les résultats du cas qui conduirait au minimum d'émissions en faisant abstraction de toute autre dimension que nous notons Mini. Le cas actuel a été déjà évalué dans le paragraphe 6.2.2.2 et les résultats sont illustrés dans le Tableau 6.3. La référence minimale est calculée en faisant l'hypothèse que tous les flux sont livrés directement des entrepôts aux plateformes en camion complet. Cela permet d'obtenir la borne inférieure des émissions de CO₂. Quant aux résultats d'optimisation, ceux des scénarios S1 et S2, ils sont obtenus directement par le programme codé en utilisant le logiciel (ILOG OPL 6.3). Cependant, puisque le modèle du CVRP adapté aux scénarios S3 et S4 n'est pas capable

de traiter les flux multi-périodes, l'optimisation dans ces cas est résolue semaine par semaine. Donc leurs résultats sont obtenus par un post-traitement.

6.3.2 Dimension économique

Les critères économiques étudiés dans cette recherche se composent du coût de transport et du coût des stocks. Toutefois, l'optimisation ici s'est concentrée uniquement sur le transport et le coût de stocks a été évalué à partir des solutions obtenues après optimisation. Pour la méthode d'évaluation on peut se référer au chapitre de la modélisation.

Coût logistique (k€)		S0	S1	S2	S3	S4
Transport	Amont (ou tournée)	741	360	389	297	725
	Transit par plateforme	202	-	-	110	195
	Passage par centre	-	201	103 ~ 566	201	-
	Aval (ou direct)	-	347	429	466	-
Stock	Stocks de fournisseur	79,5	-	49	-	83
	Stocks intermédiaires	-	281	19	165	-
	Stocks de distributeur	79,5	21	18	19	83
Somme		1102	1210	1007 ~ 1471	1258	1086

Tableau 6.6 : Liste des résultats économiques (sur l'ensemble des flux de 33 semaines)

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

La deuxième remarque tient au fait que, contrairement aux scénarios S1, S2 et S3, les scénarios S0 et S4 ne supportent pas le coût de transport aval et le coût des stocks intermédiaires en raison de l'absence de centre de mutualisation. Quant aux stocks intermédiaires, selon les expériences du côté des industriels, nous avons mis une semaine comme durée temps de stockage par palette au centre de consolidation et un jour pour le centre de cross-docking. Il s'agit du temps pour réaliser la consolidation des flux, ainsi que le coût des stocks en fonction des différentes stratégies. C'est la raison pour laquelle, dans le Tableau 6.6, le coût en termes de stock du scénario S2 est largement inférieur à celui des scénarios S1 et S3.

6.3.3 Synthèse des résultats

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

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

Tableau 6.7 : Résultats des 4 scénarios d'optimisation et des références

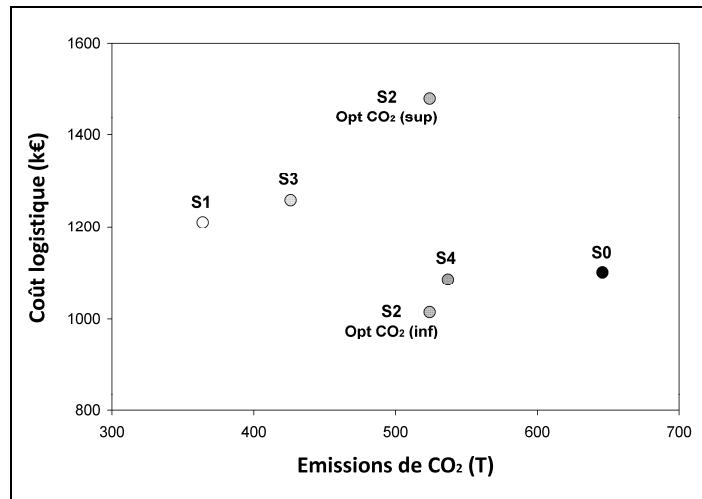


Figure 6.16 : Trade-off entre les émissions de CO₂ et les coûts logistiques

Selon la Figure 6.16, nous pouvons constater que tous les scénarios étudiés ont une meilleure performance en termes d'émissions de CO₂ par rapport au cas actuel le S0. Malgré l'hypothèse prudente quant à l'estimation de la performance du cas actuel, nous pouvons observer que les différents scénarios de mutualisation atteignent une réduction des émissions de CO₂ comprise entre 16 % et 43 %. De plus, nous avons identifié le potentiel maximal de réduction des émissions de CO₂ à savoir 49% des émissions de référence. En raison de l'hypothèse de livraisons directes (via centre intermédiaire) en camions complets, le scénario 1 produit des émissions très comparables à la valeur de référence minimum.

Du point de vue économique, les scénarios d'optimisation montrent une performance comparable en termes de coûts logistiques. Comme le montre la Figure 6.16, le scénario S4 est très proche de la référence, car tous les deux adoptent la même stratégie de multi-pick. Par ailleurs, le coût du scénario S1 n'est pas très supérieur à celui du cas actuel S0. Néanmoins, en raison du périmètre de cette étude, nous n'avons pas pu évaluer l'impact sur le stock de sécurité. Or, la rotation des produits doit être plus rapide après mutualisation ce qui doit conduire à une diminution du niveau des stocks de sécurité.

6.3.4 Discussions

En termes d'émissions, la mutualisation propose donc une solution d'organisation pertinente sur la population des PME du périmètre étudié. Les différents scénarios démontrent une performance meilleure que la situation actuelle dite de référence. En particulier, les scénarios comprenant des camions complets présentent l'avantage de diminuer les émissions. Par exemple, avec une réduction de 43%, le scénario 1 tend vers la réduction maximale de 49%. Le S3 est un peu moins performant, mais il conduit également une réduction de 34% par rapport au cas actuel.

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

Par exemple, le scénario 1, avec l'hypothèse de camions complets a la meilleure performance en termes de réduction des émissions de CO₂, mais en générant des stocks supplémentaires, sauf lorsque des volumes importants doivent être expédiés. En conséquence, S1 pourrait être sélectionné pour les fournisseurs à plus fort volume dans le panel des fournisseurs.

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

6.4 Conclusion

Cette étude, qui repose sur le thème de la mutualisation des chaînes logistiques, vise à mesurer l'intérêt de ce type d'organisation pour répondre aux tensions actuelles de la logistique de la grande distribution. Comment réduire les émissions du transport et les coûts logistiques tout en maintenant, voire en améliorant le taux de service ? Dans cette étude, nous avons exploré quatre modèles types de mutualisation pour des PME fournisseurs de la grande distribution afin d'éclairer les décideurs de ces entreprises pour répondre à ces nouvelles exigences. Via les modèles d'optimisation développés pour chaque scénario, nous les avons évalués quantitativement en termes d'émissions de CO₂ et du coût logistique.

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

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

D'un point de vue économique, l'évaluation de l'impact économique a pris en compte les facteurs les plus importants (transport, transit et stockage). Les scénarios optimisés montrent des différences de coûts en fonction de l'organisation logistique, mais tous sont comparables avec la situation actuelle estimée. En chiffre, le scénario S4 dit multi-pick présente la meilleure performance économique qui est quasiment identique au statu quo S0. Mais pour les S1 et S3 qui sont les plus performants en réduction des émissions, ils ont respectivement un surcoût de 10% et 14% par rapport à l'estimation du statu quo en raison du haut niveau de stocks dans les centres de mutualisation. De plus, il est difficile de comparer le S2 avec les autres scénarios, car il n'offre que les valeurs supérieures et inférieures d'optimisation. Mais selon la Figure 6.16, on pourra envisager que le coût réel du S2 doit être également comparable avec les autres. En outre, avant application, les autres coûts logistiques doivent

être identifiés dans l'évaluation afin d'assurer la faisabilité du concept, notamment l'investissement, les systèmes d'informations, etc.

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

Chapitre 7. Conclusion générale : apports, limites et perspectives de la mutualisation

Ce chapitre constitue la conclusion générale de cette thèse de doctorat. Pour une meilleure compréhension de la contribution de cette recherche, nous synthétiserons d'abord les apports et les résultats obtenus dans les chapitres précédents. Puis, nous discuterons des principales limites de cette recherche. Pour finir, nous aborderons les perspectives de mise en œuvre des principes de la mutualisation, qui pourront donner lieu à des prolongements ainsi qu'offrir une base de travail pour mener d'autres travaux dans ce domaine.

7.1 Récapitulatif des apports de ce travail

Comme indiqué en introduction de cette thèse, ce travail de recherche a consisté à proposer et à étudier une nouvelle démarche de consolidation des marchandises, la mutualisation des schémas logistiques, afin d'en améliorer la performance et plus particulièrement la performance environnementale. A cette fin, nous avons élaboré et défini les principes de la mutualisation d'une manière générale même si par la suite ils ont été appliqués à des réseaux de la grande distribution en France, à travers deux études de cas et via la modélisation des problèmes de transport sous-jacents. Ainsi, les apports de ce travail peuvent être développés comme suit.

7.1.1 Mise en place des principes de la mutualisation

Au début de cette recherche, la mutualisation était encore rarement étudiée dans le domaine de la chaîne d'approvisionnement. La grande distribution par exemple, recherchait des économies d'échelle principalement par des regroupements au niveau de ces centres de distribution et les fournisseurs par des entrepôts centraux qui reconstituent également la gamme des produits. Même si de nombreux sites étaient confiés à des prestataires, les opérations étaient réalisées client par client et les synergies possibles étaient rares. De plus, il s'est avéré que les démarches de consolidation au niveau opérationnel étaient de plus en plus remises en cause par les contraintes antagonistes, telles que la tension sur les flux, le manque de visibilité sur les flux (notamment au niveau de l'horizon temporel de regroupement) et les contraintes imposées par chaque client. La performance atteinte arrive dès lors en contradiction avec les exigences environnementales mais également économiques (réduction

des stocks et des coûts logistiques), en conséquence, une nouvelle organisation devient nécessaire. C'est en réponse à ces éléments que la mutualisation a été proposée.

La mutualisation a été décrite comme une nouvelle démarche de consolidation par une collaboration inter organisationnelle à moyen, voir à long terme. Pour ce faire, nous avons d'abord donné sa définition puis mis en place cinq principes caractéristiques :

- Mutualisation des entrepôts fournisseurs par famille produits
- Mutualisation des entrepôts fournisseurs par proximité géographique des expéditions
- Mutualisation des plateformes distributeurs par proximité géographique des livraisons
- Mutualisation des moyens de transport
- Mutualisation des schémas logistiques

Ces principes, comme la consolidation, ont pour but de la mise en commun des ressources logistiques déjà existantes ou non, entre les acteurs et en dépassant les contraintes antagonistes au niveau de l'organisation du transport de fret par la définition de schémas logistiques communs, dès lors les moyens (entrepôts, camions, etc.) sont planifiés en commun.

En outre, il est nécessaire de souligner que la mutualisation n'est pas une démarche qui exclut les autres solutions de consolidation mais qui peut en partie s'y substituer. En revanche, cette démarche met en évidence une nouvelle dimension stratégique de la chaîne logistique : la collaboration horizontale. Par exemple, le principe de flux tendu (Cross-docking) est particulièrement difficile à réaliser pour des PME fournisseurs en raison de leurs expéditions de faibles volumes. La mutualisation permet à ces entreprises de livrer leurs flux ensemble par les camions complets en maintenant, voir en augmentant la fréquence de livraison aux distributeurs ; de même pour les grands fournisseurs sur des destinations à faible flux ou en permettant l'utilisation de moyens lourds, inaccessibles individuellement. On constate d'ailleurs que la mutualisation reçoit de plus en plus l'attention des chercheurs et des spécialistes logistiques, comme en témoigne depuis 2009 les séminaires, forums, sessions spéciales et projets de recherche mais aussi industriels.

De plus, il faut noter que le concept de la mutualisation, ici évalué au regard de son impact sur le transport, peut se déployer à d'autres activités logistiques autre que les livraisons, par

exemple la production, le conditionnement, etc. Dans ce cas-là, les réseaux logistiques sont encore davantage mutualisés.

7.1.2 Objectif de la minimisation des émissions du transport et création de nouveaux modèles d'optimisation

Par rapport à la plupart de travaux sur la logistique qui posent les problèmes en termes économiques (de minimisation de coût), ce travail se penche sur l'aspect environnemental et cherche à minimiser les émissions de CO₂ du transport par la conception de réseaux logistiques. Le modèle n'a donc pas abordé la minimisation des émissions sous un aspect règlementaire incitatif (taxe carbone). Cet objectif s'inscrit dans le sujet GCSM (*Green Supply Chain Management*) qui se fonde sur le concept du Développement Durable.

A priori plusieurs approches sont possibles de rendre la logistique plus « verte ». Ce travail se concentre sur l'amélioration de l'efficacité du transport principale source d'émission et de consommation des ressources fossiles. Afin d'évaluer quantitativement la performance des principes de la mutualisation, nous avons d'abord modélisé le facteur et proposé une fonction d'émissions de CO₂ pour deux moyens de transport qui sont les plus répondus en France : le tracteur routier (semi-remorque) et le train à traction électrique. De fait, il existe de nombreuses références concernant les facteurs d'émission dans la littérature. Par contre, ces références sont différentes l'une de l'autre en raison du contexte de leur élaboration comme le montre le Chapitre 1. C'est la raison pour laquelle nous avons décidé d'établir ces facteurs à partir d'une méthode analytique, en faisant les hypothèses qui correspondent aux conditions d'utilisation des moyens de transport concernés par la logistique.

La modélisation des fonctions d'émissions pour des moyens de la chaîne logistique de la grande distribution montre que les émissions sont fortement liées à la charge des moyens à la différence des moyens légers utilisés en ville par exemple. La fonction d'émissions a été déterminée sous une forme linéaire par morceaux discontinu. Cette définition a induit un impact sur les modèles existants en matière de transport de fret. En effet, la plupart des modèles sont fondés sur l'hypothèse que la fonction du coût de transport est continue par rapport aux flux transportés, autrement dit, la capacité des moyens de transport n'est pas considérée dans les modèles. Cette hypothèse n'a pas été adoptée pour la construction de la fonction d'émissions, ainsi que la fonction de coût de transport, dans cette étude, car la minimisation des émissions table principalement sur l'utilisation maximale de la capacité des

moyens, les camions complets par exemple. Donc, une fonction linéaire par morceaux et discontinue est intégrée dans les modèles.

Les modèles d'optimisation construits dans ce travail reposent essentiellement sur le problème des émissions du transport, mais ils ont également été appliqués pour minimiser le coût du transport. L'avantage de ces modèles est qu'ils évaluent de manière plus précise la performance du transport, puisque la fonction objectif est dépendante à la fois des flux et de la capacité des moyens. Pourtant, le désavantage est aussi évident : le problème d'optimisation est plus compliqué à cause de la fonction linéaire par morceaux. C'est pourquoi, lors de l'application des modèles aux études de cas, nous avons recherché et utilisé des méthodes de résolutions qui permettent de simplifier les problèmes. Considérant que ces résolutions sont mises en place selon les particularités de chaque problème, il faut se garder de généraliser les méthodes de résolution construites dans cette thèse au niveau de l'application, mais cela constitue néanmoins un point de départ possible.

7.1.3 Etudes de pilotes de mutualisation logistique

Sachant que ce n'est que depuis peu que la mutualisation est envisagée en logistique, nous n'avons pas pu trouver des retours d'expériences, ni d'études pilote il y a trois ans. Les études réalisées dans cette thèse ont en partie suppléés à cette lacune et complètent les expériences intervenues depuis ou en parallèle.

Selon un rapport de 2009 (PIPAME et CNAM, 2009b) qui a porté sur la mutualisation logistique, il est mentionné qu'il y a quelques expériences de mutualisation en France. Outre nos études, quatre projets ont été réalisés et ont obtenu des résultats positifs qui sont aussi présentés dans (PIPAME et CNAM, 2009b) :

1) La mutualisation de trois PME fournisseurs de la grande distribution (BENEDICTA, PASTACORP et NUTRIMAIN) qui livrent des distributeurs communs. La mutualisation a été réalisée par un prestataire commun (3PL) des fournisseurs concernés et via un outil de GMA⁵⁹ (Gestion Mutualisée des Approvisionnements), parfois appelé GPAM (gestion partagée des approvisionnements mutualisés). Les résultats de ce projet sont : après la mutualisation, la fréquence de livraison a augmenté 34%, le chargement des camions expédiés

⁵⁹ <http://www.faq-logistique.com/GCL-Logiguide-Vol10Num05-GMA-Collaboration-Logistique.htm>

a passé de 13 à 28 palettes, la couverture de stock a diminué de 16%, soit 3 jours de stocks en moins, et une réduction à 56% sur les kilomètres réalisés ;

2) SARA LEE et CADBURY ont aussi acquis une expérience de mutualisation. Ils ont fait mutualiser leurs livraisons issues de leurs entrepôts prestés aux alentours d'Orléans qui ont la même destination. Après la mutualisation, le taux de service a progressé d'un demi-point, le niveau de stocks a diminué entre 15% et 38%, le nombre de livraisons a baissé de 35%, et il a été constaté une réduction de 93 tonne de CO₂ par année ;

3) Le troisième projet est dénommé HECORE pour HENKEL, COLGATE et RECKITT. Ces trois industriels se sont réunis afin d'opérer une plateforme mutualisée au sud est de Paris. Ce projet était cependant plus motivé par la réduction des stocks en augmentant la fréquence de livraison après mutualisation. Les résultats de ce projet sont aussi très encourageants : le taux de chargement est passé de 75% à près de 100%, le nombre de km et de véhicule a été réduit de 20%, ce qui a généré une réduction de 3150 tonne de CO₂ par année.

4) Le quatrième projet est présenté dans le rapport (PIPAME et CNAM, 2009b) : le transport mutualisé de la filière fruits et légumes du MIN (Marchés d'Intérêt National) de Rungis. Il s'agit de mutualiser les livraisons des grossistes au départ du MIN de Rungis pour leurs clients détaillants situés à Paris, afin de concilier la performance des entreprises et la réduction des nuisances sur l'environnement. Ce projet rejoint le problème du transport urbain de marchandises. A cette étape des résultats quantitatifs ne sont pas présentés dans ce rapport (PIPAME et CNAM, 2009b), car il consiste à explorer l'état des lieux et recueillir les réactions et les attentes des acteurs de l'étude. Mais ce rapport montre une perspective de mise œuvre de la mutualisation logistique.

Quoique les résultats montrés ci-dessus soient difficile à comparer, les retours d'expériences des quatre projets démontrent que la mutualisation logistique parvient à améliorer la performance des entreprises, par exemple augmenter la fréquence de livraisons, baisser le niveau des stocks, réduire les impacts sur l'environnement, etc. Or, les périmètres des projets indiqués ci-dessus ont concerné quelques fournisseurs, ou clients, qui sont situés géographiquement dans la même zone. Cela induit un nombre très limité des participants dans chaque cas. Sachant que l'effet de la mutualisation est en rapport avec le nombre d'acteurs, nous pouvons prévoir que reconcevoir les réseaux logistiques avec plus d'acteurs apportera une meilleure performance aux entreprises.

De ce point de vue, nous avons élaboré les principes de mutualisation du transport au niveau stratégique de la conception d'un ensemble de réseaux. Afin de tester ces principes, deux études de cas ont été réalisées dans cette thèse en collaboration avec les partenaires industriels, principalement le Club Déméter et la FEEF. Cette collaboration nous a permis d'évaluer quantitativement et qualitativement la performance des schémas mutualisés à partir des cas pratiques et des données réelles de la grande distribution hexagonale.

Les deux études ont porté respectivement sur les fournisseurs nationaux les plus importants qui sont en commun entre deux grands distributeurs Carrefour et Casino, et sur les PME fournisseurs régionaux (5 départements de l'ouest en France) qui livrent le même distributeur Carrefour. Ces deux études ont, probablement pour la première fois, examiné la mutualisation à grande échelle : la première a porté sur environ 191 sites nationaux de 109 fournisseurs et 48 plateformes pour les deux distributeurs et la deuxième a concerné plus de 200 fournisseurs et 5 plateformes régionales. L'objectif des études est de concentrer les flux concernés dans le réseau régional ou national par la mutualisation, afin de définir les nouveaux schémas logistiques générant de moindre d'émissions de CO₂ au niveau du transport. Cependant, la conception de nouveaux réseaux de distribution par la mutualisation ne nécessite pas que tous les acteurs soient ensemble car d'une part il peut y avoir des accords locaux et d'autre part il y a des cas où des flux directs sont plus pertinents. Par rapport aux expérimentations, nous avons étudié la mutualisation du point de vue plus global au niveau d'un ou deux distributeurs ce qui permet d'en définir l'enjeu. Cependant, si ces travaux avaient inclus d'autres fournisseurs et d'autres enseignes de nouvelles possibilités mutualisation auraient certainement pu être mises en avant.

7.2 Limites principales

Principalement, il existe deux limites dans ce travail de recherche : la première concerne le périmètre retenu et la seconde les méthodes de résolution.

7.2.1 Périmètre des émissions

La première limite à signaler concerne le périmètre des émissions, par exemple celles des sites logistiques ne sont pas prises en compte dans les modèles. Cette partie d'émissions est due aux activités sur les plateformes, par exemple les transports de flux internes, l'usage

d'énergie (gaz, électricité, etc.) par l'infrastructure, ou même les transports de personnels. En effet, ces émissions ne sont pas présentées à cette étape du fait que, d'une part, les données concernant l'usage des sites logistiques ne sont pas ou très peu disponibles dans la littérature, voir à ce titre le Bilan Carbone (Jancovici, 2007) qui étudie les émissions des immobilisations au niveau de la construction et de son «amortissement». D'autre part, cette partie des émissions est faible et dépend peu des flux, donc elle est moins sensible. En conséquence, il a été fait l'hypothèse dans les modèles d'optimisation que les émissions de CO₂ des infrastructures sont négligées. Par contre, nous devons indiquer que cette considération sur cette partie des émissions peut éventuellement changer les résultats, notamment sur le nombre optimum de centres de mutualisation. Car, il est assez clair que le nombre croissant de centres favorise le transport mais apporte aussi des émissions supplémentaires. Une optimisation de leur nombre est donc possible et conduira certainement à l'augmentation de leur nombre sur un critère d'émission.

La chaîne logistique considérée ici comprend déjà plusieurs « maillons » mais en néglige également trois. L'amont industriel qui a été écarté car souvent constitué de flux importants, mais aussi et surtout l'aval. En effet, la distribution vers les magasins et vers les particuliers et encore plus difficile à optimiser individuellement que les opérations étudiées. Il existe donc à ce niveau un gisement important pour une réduction des émissions et ceci dans des zones propices car souvent denses et où sont utilisés les moyens les plus émetteurs de GES par tonne transportée : camion, léger, fourgonnette, etc. Enfin, la part logistique arrivée par les clients n'a pas été prise en compte : course en voiture, à pied, etc.

7.2.2 Méthodes de résolution et contraintes complémentaires

En termes de méthodes de résolution, nous avons vu les hypothèses nécessaires pour obtenir des résultats et ceci dans un cadre simplifié.

Or plusieurs contraintes n'ont pas été considérées dans les modèles, telles que la capacité des plateformes, le temps de transport, la disponibilité des moyens et des infrastructures ferroviaires lors du report modal, ainsi que les trajets retour. Afin de simplifier les problèmes, seules les contraintes les plus sensibles à l'optimisation et au niveau stratégiques ont été intégrées. Par exemple, la localisation des sites logistiques, le taux de service aux distributeurs et la capacité des moyens de transport sont les aspects essentiels.

L’ajout de contraintes supplémentaires serait de nature à la fois à rendre le problème plus rapide à résoudre mais aussi plus réaliste dans ces résultats.

Les fonctions d’émission relativement précise étant aujourd’hui connues, une autre voie pour contourner la difficulté de la résolution serait de passer par des fonctions objectifs certes moins précises au niveau des émissions mais plus efficaces en termes de temps de calcul : linéaire par morceaux mais continue et concave par exemple. Une telle hypothèse devrait cependant être validée.

En somme, les limites citées ci-dessus, correspondent à l’amélioration de facteurs déjà pris en compte dans cette thèse, mais cela ne doit pas faire oublier que des études supplémentaires seront nécessaires au niveau de l’application des résultats obtenus.

7.3 Perspectives et élargissement de la réflexion pour la mise en œuvre de la mutualisation

Les résultats obtenus à travers nos études indiquent que la mutualisation logistique peut être une solution pour améliorer sensiblement l’efficacité du transport de marchandises et ainsi réduire les émissions de CO₂ qui lui sont liées. Ce résultat interroge donc la perspective de la mise en œuvre de la mutualisation dans la grande distribution par exemple. Au delà des quelques expérimentations citées, il convient d’indiquer que leur généralisation ne paraît pas immédiate car il existe encore de nombreux points à étudier et à ne pas négliger.

7.3.1 Intégration des systèmes d’informations

Au niveau informatique, afin de partager les informations logistiques, une plateforme de services logiciels qui relie les systèmes d’informations sera nécessaire. En effet, les entreprises logistiques aujourd’hui prêtent de plus en plus d’attention à la gestion de l’information, car cela est un des facteurs décisifs pour rendre la logistique plus efficace. La mutualisation demande une telle gestion afin que les acteurs, notamment à travers des tiers, puissent organiser en commun leurs capacités de transport, de stockage, etc. en ne connaissant chacun que leur partie du flux mutualisé.

Du fait que les systèmes d’informations logistiques sont généralement différents entre les entreprises, on peut présumer que l’incompatibilité, ou le non-synchronisme de ces systèmes

va freiner le développement de la mutualisation. Relier des systèmes différents sur une plateforme logicielle pourra atténuer, voir éviter cet inconvénient. Il existe d'ailleurs à ce jour des outils qui vont dans ce sens, par exemple la GMA ou encore GPAM en rapport avec la mutualisation issus de la GPA (Gestion Partagée des Approvisionnements) ou du CPFR (*Collaborative Planning Forecasting and Replenishment*), etc., voire de nouveaux outils informatiques au niveau de la recherche comme par exemple le Supply Web présenté dans le travail de Montreuil et al. (Montreuil et al., 2009). Ces outils donnent la possibilité de la mise en œuvre de données logistiques dans un cadre intégré mais avec la possibilité d'en obtenir des vues spécifiques (métier, acteur, etc.). La structuration d'outils informatiques en ce sens reste encore à rechercher et à développer pour répondre aux besoins futurs.

7.3.2 Construction de coalitions

La première question concerne la construction de la coalition, autrement dit la recherche des partenaires et la faisabilité de tels partenariats. La mise en œuvre de la mutualisation est une démarche à long terme et au niveau stratégique de l'entreprise. Il faut donc qu'il existe des lieux et des acteurs pour favoriser les rencontres entre partenaires potentiels. Il convient en outre que la mutualisation s'appuie sur un tiers qui l'opérera et que l'ensemble dégage suffisamment d'économie pour que cet investissement soit intéressant pour tous les partenaires. Il faut également que la coalition formée soit stable au sens de la théorie des jeux coopératifs pour éviter qu'un partenaire opportuniste se désengage et réduise de manière insoutenable le bénéfice de la mutualisation. Il existe donc un champ de recherche important à développer pour étudier dans quelle mesure les principes de la mutualisation pourraient être mis en œuvre au sein des chaînes logistiques.

En outre, la particularité de la mutualisation est d'engendrer des opportunités de collaboration entre non seulement des fournisseurs et des clients, mais aussi des concurrents. Par exemple, les études de cas réalisées démontrent que le partage des plateformes entre des distributeurs apporte des bénéfices notamment dans les zones à faible densité. Des cas identiques peuvent également être trouvés entre les fournisseurs dans les cas étudiés. Il conviendra donc d'étudier de manière rigoureuse les implications qui en résultent et notamment juridiques : lois anti-trust, tiers de confiance, etc.

7.3.3 Règles d'engagement et répartition équitable des gains

Dans le cas où, comme dans ce travail, il existe un intérêt notable à la mutualisation, il convient pour les acteurs de définir des règles de planification et d'engagement des ressources partagées. Il s'agit de ressources physiques entrepôt, manutention, stockage, camions, etc. mais aussi des informations logistiques, des progiciels et également des savoir-faire. Pour cette raison, des règles de gestion définies en commun sont donc nécessaires et à définir en amont. Par exemple, il faut définir les règles pour partager les moyens de transport au niveau de l'affectation et l'organisation, ainsi que les règlements des litiges au sein de la coalition. Ces règles d'engagement pourront être définies dans des chartes de mutualisation par exemple.

Plus particulièrement, la répartition des gains devra être «équitable» entre les partenaires. Ce problème pourrait être confié à la négociation entre les partenaires, à charge pour eux de trouver un accord. Il semble cependant également intéressant de mobiliser ici la théorie des jeux coopératifs et notamment les travaux autours de la valeur de Shapley (Shapley Value) (Winter et al., 2002) pour proposer un partage objectif des gains. A ce sujet, deux études sont en cours. La première consiste à explorer la stabilité et le partage des gains de sous coalition dans le cadre des données de cette thèse. La seconde consiste à participer à une étude européenne en cours de financement CO3. Il est cependant trop tôt pour en indiquer les résultats dans le cadre de cette thèse.

7.4 La mutualisation : une contribution à une logistique plus partagée et soutenable

Cette thèse contribue à démontrer que la recherche sur la mutualisation des activités logistiques est porteuse de promesses mais recèle encore de nombreux sujets. Nous espérons que les outils développés ici et les études réalisées attirent encore plus d'attentions de la part des chercheurs et des spécialistes en logistique pour ouvrir un nouveau chapitre de recherche sur ce sujet. En effet, remarquons que malgré des résultats encourageants entre -14% et -50% d'émission de CO₂, cette démarche, à elle seule, et même dans un déploiement complet ne permettra sans doute pas d'atteindre le « Facteur 4 ». Il reste donc à proposer des solutions complémentaires, voir de substitution pour pousser plus en avant l'idée de la mutualisation et de rationalisation des moyens mis en œuvre. A ce titre les travaux initialisés au sein du groupe *Physical Internet Initiative* constituent une piste très intéressante et également un

prolongement de ce travail pour atteindre le « Facteur 4 » ou le dépasser pour conserver le service logistique auquel nous sommes habitués sans pour autant que cela se fasse au détriment des nos ressources naturelles et donc à notre propre détriment ou au détriment des générations à venir.

8. Bibliographies

1. ADEME, 2007. Dossier de presse :Transport routier et développement durable (Signature des premières chartes d'engagements volontaires de réduction des émissions de CO2).de l'Equipement ADEME et Ministère des Transports, du Tourisme et de la Mer. Paris.http://developpement-durable.gouv.fr/IMG/spipdgmt/pdf/Dossier_de_presse_charte_CO2_cle5b5376-1.pdf
2. Aggeri, Pezet, Abrassart et Acquier, 2005. Organiser le Développement Durable. Paris, Vuibert.2-7117-6962-3.
3. Ahuja, Magnanti et Orlin, 1993. Network Flows: theory, algorithms, and applications. New Jersey, Prentice Hall.0-13-617549-X.
4. Allain et Chambolle, 2003. "Les relations entre producteurs et distributeurs : Bilan et limites de trente ans de régulation." Revue Française d'Economie, 17(4): 170.
5. Ambrosino et Grazia Scutella, 2005. "Distribution network design: New problems and related models." European Journal of Operational Research, 165(3): 610-624.
6. Amiri, 2006. "Designing a distribution network in a supply chain system: Formulation and efficient solution procedure." European Journal of Operational Research, 171(2): 567-576.
7. Anderson et Narus, 1990. "A Model of Distributor Firm and Manufacturer Firm Working Partnerships." The Journal of Marketing, 54(1): 42-58.
8. Artous, 2003. "L'évolution du métier de prestataire logistique." Notes de synthèse du SESP, Juillet-Août.
9. Ballot, 2009. Modèles d'aide à la décision pour les chaînes Logistiques (Habilitation à Diriger des Recherche) Grenoble
10. Ballot et Fontane, 2008a. Reducing greenhouse gas emissions through the collaboration of supply chains: lessons from French retail chains. International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain Conference, Madison, Wisconsin, May 27-30, 2008.
11. Ballot et Fontane, 2008b. "Rendement et efficience du transport: un nouvel indicateur de performance." Revue Française de Gestion Industrielle, 27(2).
12. Ballot et Fontane, 2008c. "Transport performance and efficiency: Overall Vehicle Effectiveness." Transportation Research Part E: Logistics and Transportation (Review Under review since june 2008).
13. Ballot et Fontane, 2010. "Reducing transportation CO2 emissions through pooling of supply networks: perspectives from a case study in French retail chains." Production Planning & Control: The Management of Operations, 21(6): 640 - 650.
14. Becker, 2003. Rapport du groupe de travail : Le développement des implantations logistiques en France et ses enjeux pour les politiques d'aménagement. Paris: Ministère de l'équipement, des transports, du logement, du tourisme et de la mer
15. Benjaafar, Li et Daskin, 2010. "Carbon Footprint and the Management of Supply Chains : Insights from Simple Models." (under review).
16. Bernadet, 1997. Le Transport Routier de Marchandise: Fonctionnement et dysfonctionnements. Paris, Economica.2-7178-3200-9.
17. Bertazzi, Speranza et Ukovich, 1997. "Minimization of logistic costs with given frequencies." Transportation Research Part B: Methodological, 31(4): 327-340.
18. Bloemhof-Ruwaard, van Beek, Hordijk et Van Wassenhove, 1995. "Interactions between operational research and environmental management." European Journal of Operational Research, 85(2): 229-243.

19. Blumenfeld, Burns, Diltz et Daganzo, 1985. "Analyzing trade-offs between transportation, inventory and production costs on freight networks." *Transportation Research Part B: Methodological*, 19(5): 361-380.
20. Bookbinder et Higginson, 2002. "Probabilistic modeling of freight consolidation by private carriage." *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 38(5): 305-318.
21. Bostel, Dejax et Lu, 2005. *The Design, Planning, and Optimization of Reverse Logistics Networks*. *Logistics Systems: Design and Optimization*. Springer US: 171-212.
22. Bowersox, 1990. The strategic benefits of logistics alliances, *Harvard Business Review* (July-August): 36-45.
23. Burgess, Singh et Koroglu, 2006. "Supply chain management; a structured literature review and implications for future research." *International Journal of Operations & Production Managements*, 36(7): 703-729.
24. Burns, Hall, Blumenfeld et Daganzo, 1985. "Distribution Strategies that Minimize Transportation and Inventory Costs." *Operations Research*, 33(3): 469-490.
25. Campbell, 1990. "Freight consolidation and routing with transportation economies of scale." *Transportation Research Part B: Methodological*, 24(5): 345-361.
26. Campbell, 1994. "Integer programming formulations of discrete hub location problems." *European Journal of Operational Research*, 72: 387-405.
27. Campbell, 1996. "Hub Location and the p-Hub Median Problem." *Operations Research*, 44(6): 923-935.
28. Campbell, Ernst et Krishnamoorthy, 2005a. "Hub Arc Location Problems: Part I: Introduction and Results." *Management Science*, 51(10): 1540-1555.
29. Campbell, Ernst et Krishnamoorthy, 2005b. "Hub Arc Location Problems: Part II: Formulations and Optimal Algorithms." *Management Science*, 51(10): 1556-1571.
30. Campisi et Gastaldi, 1996. "Environmental protection, economic efficiency and intermodal competition in freight transport." *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 4(6): 391-406.
31. Carbone et Stone, 2005. "Growth and relational strategies used by the European logistics service providers: Rationale and outcomes." *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 41(6): 495-510.
32. Çetinkaya, Mutlu et Lee, 2006. "A comparison of outbound dispatch policies for integrated inventory and transportation decisions." *European Journal of Operational Research*, 171(3): 1094-1112.
33. Chan, Muriel, Shen, Simchi-Levi et Teo, 2002. "Effective Zero-Inventory-Ordering Policies for the Single-Warehouse Multiretailer Problem with Piecewise Linear Cost Structures." *Management Science*, 48(11): 1446-1460.
34. Chardine-Baumann et Botta-Genoulaz, 2010. A multi-criteria decision-making approach for selecting supply chain management practices according to sustainable development issues. 3rd International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain (ILS 2010), Casablanca, Morocco 14~16/04/2010.
35. Chen et Paulraj, 2004. "Towards a theory of supply chain management: the constructs and measurements." *Journal of Operations Management*, 22(2): 119-150.
36. Cheung, Tong et Slack, 2003. "The transition from freight consolidation to logistics: the case of Hong Kong." *Journal of Transport Geography*, 11(4): 245-253.
37. Chopra, 2003. "Designing the distribution network in a supply chain." *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 39(2): 123-140.
38. Chopra et Meindl, 2004. *Supply chain management: Strategy, planning and operation*, 2nd Edition, Prentice Hall.0-13-121745-3.

39. Christiansen, Fagerholt, Nygreen, Ronen, Cynthia et Gilbert, 2007. Chapter 4 Maritime Transportation. Handbooks in Operations Research and Management Science. Elsevier. Volume 14: 189-284.
40. Christopher, 2005. Logistics and supply chain management: creating value-added networks, 3rd edition. London, Prentice Hall. 0-273-68176-1.
41. CITEPA, 2010. Inventaire des émissions de polluants atmosphériques en France - Séries sectorielles et analyses étendues. CITEPA. <http://www.citepa.org/publications/secten-avril%202010.zip>
42. CNAM et ANIA, 2007. Enquête nationale « La Logistique dans les PME-PMI de l'agroalimentaire», synthèse des résultats. Conservatoire National des Arts et Métiers and Association Nationale des Industries Alimentaires. Paris
43. Commission Européenne, 1998. Sur Les Transports et le CO₂: Pour une approche communautaire. Commission Européenne. Bruxelles, Office des publications officielles des Communautés européennes
44. Commission Européenne, 1999. The AOPII cost-effectiveness study—Part III: the transport base case. Commission Européenne, The European Commission, Standard & Poor's DRI and KULeuven
45. Commission Européenne, 2000. The AUTO-OIL II Programme - A report from the services of the European Commission. Commission Européenne. Bruxelles, The European Commission, Standard & Poor's DRI and KULeuven
46. Commission Européenne, 2001a. COMMUNICATION DE LA COMMISSION: Lignes directrices sur l'applicabilité de l'article 81 du traité CE aux accords de coopération horizontale. European Union, European Union. 2001/C 3/02. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:C:2001:003:0002:0030:EN:PDF>
47. Commission Européenne, 2001b. Livre vert - Promouvoir un cadre européen pour la responsabilité sociale des entreprises. Commission Européenne. Bruxelles, Office des publications officielles des Communautés européennes
48. Commission Européenne, 2007a. Euro VI - Impact Assessment (Commission staff working document). Commission Européenne. Bruxelles. http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/automotive/environment/eurovi/index_en.htm
49. Commission Européenne, 2007b. Règlement (CE) No°715/2007 (Emissions Standard Euro 5 et 6). Commission Européenne. Bruxelles, Journal officiel de l'Union européenne. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2007:171:0001:01:FR:PDF>
50. Cooper, 1963. "Location-Allocation Problems." Operations Research, 11(3): 331-343.
51. Crainic, 2000. "Service network design in freight transportation." European Journal of Operational Research, 122(2): 272-288.
52. Crainic et Laporte, 1997. "Planning models for freight transportation." European Journal of Operational Research, 97(3): 409-438.
53. Crainic et Semet, 2005. Recherche opérationnelle et transport de marchandises.
54. Croom, Romano et Giannakis, 2000. "Supply chain management: an analytical framework for critical literature review." European Journal of Purchasing & Supply Management, 6(1): 67-83.
55. Croxton, Gendron et Magnanti, 2003a. "A Comparison of Mixed-Integer Programming Models for Nonconvex Piecewise Linear Cost Minimization Problems." Management Science, 49(9): 1268-1273.
56. Croxton, Gendron et Magnanti, 2003b. "Models and Methods for Merge-in-Transit Operations." Transportation Science, 37(1): 1-22.

57. Croxton, Gendron et Magnanti, 2007. "Variable Disaggregation in Network Flow Problems with Piecewise Linear Costs." *Operations Research*, 55(1): 146-157.
58. Cruijssen, 2006. "Horizontal cooperation in transport and logistics (PhD thesis)", CentER for Economic Research.Tilburg University.Tilburg, Netherlands
59. Cruijssen, Cools et Dullaert, 2007. "Horizontal cooperation in logistics: Opportunities and impediments." *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 43(2): 129-142.
60. Cruijssen et Salomon, 2004. Empirical study: Order sharing between transportation companies may result in cost reductions between 5 to 15 percent. *CentER Discussion Paper*: 2004-80.
61. Daganzo, 2005. *Logistics systems analysis*, 4th Edition. Berlin, Springer.3-540-23914-6.
62. Daskin, 1995. *Network and Discrete Location: Models, Algorithms, and Applications*, Wiley-Interscience.0-471-01897-X
63. David et Hatchuel, 2007. "From actionable knowledge to universal theory in management research" in *Handbook of collaborative management*. Mohrman S.A., Pasmore W.A., Stymne B., Adler N., et Shani R.A.B., Sage,
64. Davis, 1993. "Effective supply chain management." *Sloan Management Review Summer*, 34(4): 35-46.
65. De Boissieu, 2006. Rapport du Groupe de travail "Division par quatre des émissions de gaz à effet de serre de la France à l'horizon 2050" sous la présidence de Christian de Boissieu. Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie. Paris
66. Dejax et Crainic, 1987. "Survey Paper--A Review of Empty Flows and Fleet Management Models in Freight Transportation." *Transportation Science*, November 1, 1987, 21(4): 227-248.
67. Department For Transport, 2008. *Transport Statistics Bulletin: Road Freight Statistics*.Department for Transport. London
68. Desaulniers, Lavigne et Soumis, 1998. "Multi-depot vehicle scheduling problems with time windows and waiting costs." *European Journal of Operational Research*, 111(3): 479-494.
69. Desrochers et Laporte, 1991. "Improvements and extensions to the Miller-Tucker-Zemlin subtour elimination constraints." *Operations Research Letters*, 10(1): 27-36.
70. Dincer et Elbir, 2007. "Estimating national exhaust emissions from railway vehicles in Turkey." *Science of The Total Environment*, 374(1): 127-134.
71. Doerner, Gronalt, Hartl, Kiechle et Reimann, 2008. "Exact and heuristic algorithms for the vehicle routing problem with multiple interdependent time windows." *Computers & Operations Research*, 35(9): 3034-3048.
72. Dornier, 1997. "Recomposition de l'approche logistique dans le secteur des produits de grande diffusion: intégration fonctionnelle, intégration sectorielle, intégration géographique (PhD thesis)", Centre de Gestion Scientifique.Mines ParisTech.Paris
73. EEA, 1998. COPERT II: Computer Programme to Calculate Emissions from Road Transport: Methodology and Emission Factors (Technical Report No. 6). European Environment Agency. Copenhagen
74. EEA, 2005. Overall energy efficiency and specific CO₂ emissions for passenger and freight transport.European Environment Agency. Copenhagen. http://ims.eionet.europa.eu/Sectors_and_activities/transport/indicators/TERM27%2C2005.11/TERM_2005_27_Energy_efficiency_final_version.pdf.
75. EEA, 2007. EMEP/CORINAIR Emission Inventory Guidebook - 2007. European Environment Agency.<http://www.eea.europa.eu/publications/EMEPCORINAIR5>

76. EEA, 2008. Climate for a transport change. TERM 2007: indicators tracking transport and environment in the European Union. European Environment Agency. Copenhagen.http://www.eea.europa.eu/publications/eea_report_2008_1/at_download/file
77. Eppen, 1979. "Effects of Centralization on Expected Costs in a Multi-Location Newsboy Problem." *Management Science*, 25(5): 498-501.
78. Ergun, Kuyzu et Savelsbergh, 2007. "Shipper collaboration." *Computers & Operations Research*, 34(6): 1551-1560.
79. Ernst et Krishnamoorthy, 1996. "Efficient algorithms for the uncapacitated single allocation p-hub median problem." *Location Science*, 4(3): 139-154.
80. Ernst et Krishnamoorthy, 1998. "Exact and heuristic algorithms for the uncapacitated multiple allocation p-hub median problem." *European Journal of Operational Research*, 104(1): 100-112.
81. Eurostat, 2007. Panorama of transport. Office for Official Publications of the European Communities. Belgium.http://epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY_OFFPUB/KS-DA-07-001/EN/KS-DA-07-001-EN.PDF
82. Filser, Garets et Paché, 2001. La distribution : organisation et stratégie, Management Et Société, Cean.2-912647-81-9.
83. Francois, 2007. "Planification des chaînes logistiques : modélisation du système décisionnel et performance (PhD thesis)", Ecole doctorale des Sciences physiques et de l'Ingénieur.Bordeaux I Bordeaux
84. Frota Neto, Bloemhof-Ruwaard, van Nunen et van Heck, 2008. "Designing and evaluating sustainable logistics networks." *International Journal of Production Economics*, 111(2): 195-208.
85. Frota Neto, Walther, Bloemhof, van Nunen et Spengler, 2009. "A methodology for assessing eco-efficiency in logistics networks." *European Journal of Operational Research*, 193(3): 670-682.
86. Gharzouzi et Baptiste, 2010. A method to evaluate the greenhouse gas emissions of a logistic platform: application to a Canadian platform. 3rd International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain - ILS 2010, Casablanca (Morocco), April 14-16 2010.
87. Graham, Rideout, Rosenblatt et Hendren, 2008. "Greenhouse gas emissions from heavy-duty vehicles." *Atmospheric Environment*, 42(19): 4665-4681.
88. Groothedde, Ruijgrok et Tavasszy, 2005. "Towards collaborative, intermodal hub networks: A case study in the fast moving consumer goods market." *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 41(6): 567-583.
89. Gruat La Forme, Genoulaz et Campagne, 2007. "A framework to analyse collaborative performance." *Computers in Industry*, 58(7): 687-697.
90. Guéret, Prins et Sevaux, 2002. Applications of optimization with Xpress-MP. Paris, Dash Optimization Ltd.
91. Haenel et Gerbaud, 2003. Fret ferroviaire français: la nouvelle bataille du rail. French Prime Minister. Paris
92. Hageback et Segerstedt, 2004. "The need for co-distribution in rural areas--a study of Pajala in Sweden." *International Journal of Production Economics*, 89(2): 153-163.
93. Hall, 1987. "Consolidation strategy: inventory, vehicles and terminals." *JOURNAL OF BUSINESS LOGISTICS*, Volume 8, Number 2.
94. Harrison et Hoek, 2005. Logistics Management and Strategy,2nd edition, Prentice Hall.0-273-68542-2.
95. Hesse et Rodrigue, 2004. "The transport geography of logistics and freight distribution." *Journal of Transport Geography*, 12(3): 171-184.

96. Hickman, Hassel, Joumard, Samaras et Sorenson, 1999. Methodology for calculating transport emissions and energy consumption (Report for the Projet MEET). Transport Research Laboratory. Edinburgh
97. Hinojosa, Puerto et Fernández, 2000. "A multiperiod two-echelon multicommodity capacitated plant location problem." *European Journal of Operational Research*, 123(2): 271-291.
98. Houghton, Ding, Griggs, Noguer, Linden, Dai, Maskell et Johnson, 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis (Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change)*. Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland
99. Hsu, Hung et Li, 2007. "Vehicle routing problem with time-windows for perishable food delivery." *Journal of Food Engineering*, 80(2): 465-475.
100. Jancovici, 2007. *Bilan Carbone® :Calcul des facteurs d'émissions et sources bibliographiques utilisées*. ADEME France. 240
101. Jeong, Lee et Bookbinder, 2007. "The European freight railway system as a hub-and-spoke network." *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 41(6): 523-536.
102. Jorgensen et Sorenson, 1998. Estimating emissions from railway traffic (Report for the Project MEET). Department of Energy Engineering, Technical University of Denmark. Lyngby
103. Joumard, 1999. Methods of estimation of atmospheric emissions from transport: European scientist network and scientific state-of-the-art (Action COST 319 final report). INRETS report LTE9901.
104. Kameshwaran et Narahari, 2007. "Nonconvex piecewise linear knapsack problems." *European Journal of Operational Research*, 192(1): 56-68.
105. Kara, Laporte et Bektas, 2004. "A note on the lifted Miller-Tucker-Zemlin subtour elimination constraints for the capacitated vehicle routing problem." *European Journal of Operational Research*, 158(3): 793-795.
106. Keskin et Üster, 2007. "A scatter search-based heuristic to locate capacitated transshipment points." *Computers and Operations Research*, 34(10): 3112-3125.
107. Klincewicz, 1990. "Solving a Freight Transport Problem Using Facility Location Techniques." *Operations Research*, 38(1): 99-109.
108. Klose et Drexl, 2005. "Facility location models for distribution system design." *European Journal of Operational Research*, 162(1): 4-29.
109. Kohn et Brodin, 2008. "Centralised distribution systems and the environment: how increased transport work can decrease the environmental impact of logistics." *International Journal of Logistics Research and Applications*, 11(3): 229 - 245.
110. Kuehn et Hamburger, 1963. "A Heuristic Program for Locating Warehouses." *Management Science*, 9(4): 643-666.
111. Lambert et Cooper, 2000. "Issues in Supply Chain Management." *Industrial Marketing Management*, 29(1): 65-83.
112. Langevin, Mbaraga et Campbell, 1996. "Continuous approximation models in freight distribution: An overview." *Transportation Research Part B: Methodological*, 30(3): 163-188.
113. Laporte, 1992. "The vehicle routing problem: An overview of exact and approximate algorithms." *European Journal of Operational Research*, (59): 345–358.
114. Laporte, Nobert et Desrochers, 1985. "Optimal Routing under Capacity and Distance Restrictions." *Operations Research*, 33(5): 1050-1073.
115. Lee, Cetinkaya et Jaruphongs, 2003. "A Dynamic Model for Inventory Lot Sizing and Outbound Shipment Scheduling at a Third-Party Warehouse." *Operations Research*, 51(5): 735-747.

116. Léglise, 2008. "La logistique, une activité en plein essor." Notes de synthèse du SESP, janvier-février-mars, N° 168: 9-13.
117. Léonardi et Baumgartner, 2004. "CO₂ efficiency in road freight transportation: Status quo, measures and potential." *Transportation Research Part D*, 9(6): 451-464.
118. Ljungberg et Gebresenbet, 2005. "Mapping out the potential for coordinated goods distribution in city centres: The case of Uppsala." *International Journal of Transport Management*, 2(3-4): 161-172.
119. Maillet, 2010. "Les cinq mutations de la supply chain." LSA, 18 mars, Antony, France. issue N°2128: 62-64.
120. Marins, Senne, Darby-Dowman, Machado et Perin, 1997. "Algorithms for network piecewise-linear programs: A comparative study." *European Journal of Operational Research*, 97(1): 183-199.
121. Mariotte, 2007. "L'emploi dans la fonction logistique en France." Notes de synthèse du SESP, Mars, SESP en bref n°16
122. Marmet, 2010. Reprise difficile dans le transport de marchandises. *Le Journal des Finances*. 05 juin 2010 <http://www.jdf.com/dossier/2010/06/05/04007-20100605ARTHBD00051-reprise-difficile-dans-le-transport-de-marchandises.php>
123. McKinnon, 1999. A Logistical Perspective on the Fuel Efficiency of Road Freight Transport. Edinburgh
124. McKinnon, 2000. "Sustainable distribution: opportunities to improve vehicle loading." UNEP Industry and Environment, October - December: 26–30.
125. McKinnon, 2006. CO₂ Emissions from Freight Transport in the UK.
126. McKinnon, Ge et Leuchars, 2003. Analysis of Transport Efficiency in the UK Food Supply Chain. Logistics Research Centre of Heriot-Watt University. Edinburgh
127. McKinnon et Piecyk, 2009. "Measurement of CO₂ emissions from road freight transport: A review of UK experience." *Energy Policy*, 37(10): 3733-3742.
128. McKinnon et Woodburn, 1994. "The consolidation of retail deliveries: its effect on CO₂ emissions." *Transport Policy*, 1(2): 125-136.
129. MEEDDAT, 2008. Prospective fret 2030. Ministère de l'écologie de l'énergie du développement durable et de l'aménagement du territoire, DRAST et PREDITdu MEEDDAT
130. MEEDDM, 2010a. Chiffres clés du transport : Édition 2010.MEEDDM. Paris.http://developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Chiffres_transport-pdf.pdf
131. MEEDDM, 2010b. Qu'est-ce-qu'un prestataire 4PL ?Ministère de l'Énergie de l'Énergie du Développement durable et de la Mer. Paris, Transports et sécurité routière.http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/DGITM_Prestataire_4_PL_2p_web.pdf
132. Melachrinoudis, Messac et Min, 2005. "Consolidating a warehouse network: A physical programming approach." *International Journal of Production Economics*, 97(1): 1-17.
133. Mentzer, DeWitt, Keebler, Min, Nix, Smith et Zacharia, 2001. "Defining Supply Chain Management." *JOURNAL OF BUSINESS LOGISTICS*, Vol.22, No. 2, .
134. Messeghem, 2003a. Analyse stratégique des relations entre PME et grande distribution. XIIème Conférence de l'Association Internationale de Management Stratégique, Les Côtes de Carthage, Tunis,3-6 juin 2003.
135. Messeghem, 2003b. Analyse stratégique des relations entre PME et grande distribution. XIIème Conférence de l'Association Internationale de Management Stratégique, Les Côtes de Carthage, Tunis,3-6 juin 2003.
136. Miller, Tucker et Zemlin, 1960. "Integer programming formulations and traveling salesman problems " *Journal of the Association for Computing Machinery*, 7(4): 326-329.

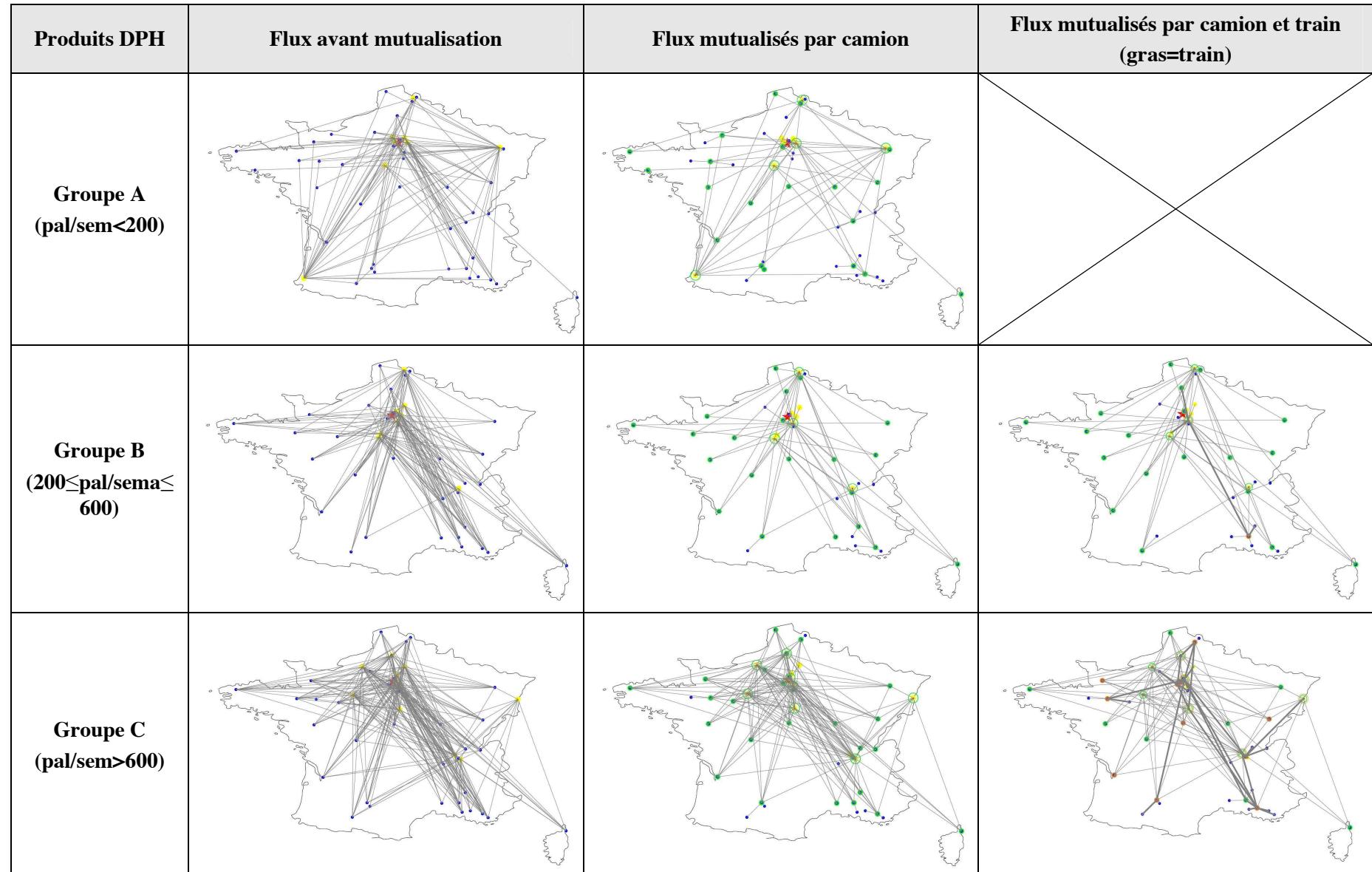
137. Moisdon, 1985. "Recherche en gestion et intervention." *Revue Française de Gestion Industrielle*.
138. Moisdon, 1997. *Du mode d'existence des outils de gestion*. Paris. Seli Arslan.
139. Montreuil, Labarthe, Hakimi, Larcher et Audet, 2009. Supply Web Mapper. International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM2009), Montreal, Canada, May 13-15.
140. Nations Unies, 1992. *The United Nations Framework Convention on Climate Change*.Nations Unies. Rio de Janeiro, Brazil
141. Nations Unies, 1998. *Protocole de Kyoto à la Convention-cadre des Nations unies sur le changement climatique*.Nations Unies. Kyoto, Japon
142. Nefussi et Saidi-Kabeche, 2006. Analyse d'un processus de décision collective :le cas d'une charte de transport collaboratif pour les IAA en Bretagne. UMR INRA/ INA P-G and M-LAB ENS Cachan France.
143. Noyer, 2010a. Comment Carrefour a réduit sa logistique de 44.000 camions.Les Echos.04 MARS 2010.P.12.
144. Noyer, 2010b. Monoprix s'appuie sur le train pour approvisionner Paris.Les Echos (Les Stratégies).25/3/2010.P.11.
145. Nozick et Turnquist, 1998. "Integrating inventory impacts into a fixed-charge model for locating distribution centers." *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 34(3): 173-186.
146. Nozick et Turnquist, 2001. "Inventory, transportation, service quality and the location of distribution centers." *European Journal of Operational Research*, 129(2): 362-371.
147. O'Kelly, 1987. "A quadratic integer program for the location of interacting hub facilities." *European Journal of Operational Research*, 32: 393-404.
148. O'Kelly et Bryan, 1998. "Hub location with flow economies of scale." *Transportation Research Part B*, 32(8): 605-616.
149. O'Kelly et Miller, 1994. "The hub network design problem: A review and synthesis." *Journal of Transport Geography*, 2(1): 31-40.
150. OECD, 2002. Logistique des transports: défis et solutions. Paris, Organization for Economic Co-operation and Development (OECD).9264298398.http://books.google.fr/books?id=NOqDDyPked4C&dq=tendance+centralisation+stocks&source=gbs_navlinks_s
151. Palmer, 2007. "The Development of an Integrated Routing and Carbon Dioxide Emissions Model for Goods Vehicles (PhD thesis)",School of Management.Cranfield University.Cranfield, UK
152. Pan, Ballot et Fontane, 2010a. Enjeux environnemental et économique de la mutualisation logistique pour les PME : le cas de l'allimentaire dans l'ouest de la France. 8e Conférence Internationale de MOdélisation et SIMulation - MOSIM'10 Hammamet, Tunisie, 10~12/05/2010.
153. Pan, Ballot et Fontane, 2010b. Environmental and economic challenges regarding the pooling of the supply chains of small businesses : a look at the food industry in Western France. 3rd International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain (ILS 2010), Casablanca, Morocco 14~16/04/2010.
154. PIPAME et CNAM, 2009a. La logistique en France : indicateurs territoriaux. Paris, Pôle interministériel de prospective et d'anticipation des mutations économiques et Conservatoire National des Arts et Métiers
155. PIPAME et CNAM, 2009b. Logistique mutualisée : la filière « fruits et légumes » du Marché d'Intérêt National de Rungis.Ministère de l'économie. Paris, Pôle interministériel de prospective et d'anticipation des mutations économiques et

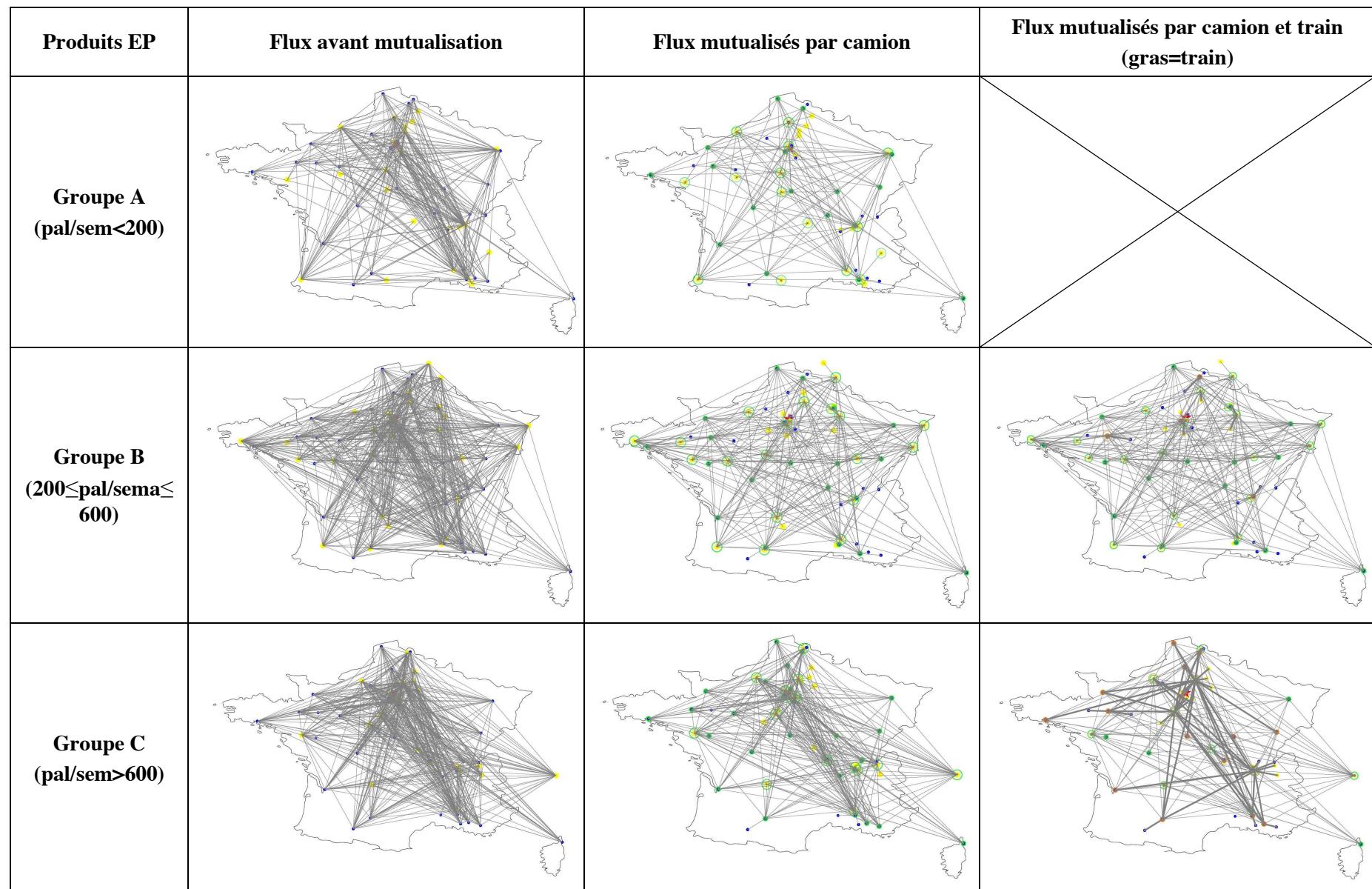
- Conservatoire National des Arts et Métiers.http://www.industrie.gouv.fr/p3e/etudes/logistique_min/etudes4.php
156. Pirkul et Schilling, 1998. "An Efficient Procedure for Designing Single Allocation Hub and Spoke Systems." *Management Science*, 44(12): S235-S242.
157. Plane, 2000. Méthodes de recherche-intervention en management,L'Harmattan.2-7384-8848-X
158. Pooley et Stenger, 1992. "Modeling and evaluation shipment consolidation in a logistics system." *JOURNAL OF BUSINESS LOGISTICS*, Vol.13, No. 2.
159. Prodhon, 2006. "Le problème de localisation-Routage (PhD thesis)",Institut Charles Daulaunay - Équipe Optimisation des Systèmes Industriels.Université de Technologie de Troyes.Troyes
160. Rognon, 2009. "Retour d'expérience CARREFOUR : Des CCC pour tendre les flux de produits secs." *Supply Chain Magazine*, MAI, (40): 22-24.
161. Romano, 2003. "Co-ordination and integration mechanisms to manage logistics processes across supply networks." *Journal of Purchasing and Supply Management*, 9(3): 119-134.
162. Roux et Liu, 2003. Optimisez Votre Plate-Forme Logistique,2nd Edition. Paris, Editions d'Organisation.2-7081-3133-8.
163. Roy, 1985. Méthodologie Multicritère D'aide À La Décision,Economica. Paris
164. Santos, Behrendt et Teytelboym, 2010. "Part II: Policy instruments for sustainable road transport." *Research in Transportation Economics* (2010), doi:10.1016/j.retrec.2010.03.002.
165. Segrestin, 2003. "La gestion des partenariats d'exploration: spécificités, crises et formes de rationalisation (PhD thesis)",Centre de Gestion scientifique.ENSMP.Paris
166. Segrestin, 2006. Coopération et Cohésion dans les régimes d'innovation contemporains (Habilitation à Diriger des Recherches). Paris
167. Selviaridis et Spring, 2007. "Third party logistics: a literature review and research agenda." *The International Journal of Logistics Management*, 18(1): 125-150.
168. Seuring et Müller, 2008. "From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management." *Journal of Cleaner Production*, 16(15): 1699-1710.
169. Shu, Teo et Shen, 2005. "Stochastic Transportation-Inventory Network Design Problem." *Operations Research*, 53(1): 48-60.
170. Skorin-Kapov, Skorin-Kapov et O'Kelly, 1996. "Tight linear programming relaxations of uncapacitated p-hub median problems." *European Journal of Operational Research*, 94(3): 582-593.
171. SOeS, 2007. La demande de transport en 2025. Projections des tendances et des inflexions (mise à jour 2007).SESP du Commissariat général au développement durable-Service de l'observation et des statistiques. Paris.<http://www.statistiques.equipement.gouv.fr/IMG/pdf/ Projections 2025 - Note de mise 340 jour mai 2007 cle7af21c.pdf>
172. SOeS, 2009. Bilan énergétique de la France pour 2008.Commissariat général au développement durable-Service de l'observation et des statistiques. Paris
173. SOeS, 2010. Chiffres clés du climat France et Monde-Edition 2010.Commissariat général au développement durable-Service de l'observation et des statistiques. Paris
174. Speranza et Ukovich, 1996. "An algorithm for optimal shipments with given frequencies." *Naval Research Logistics*, 43(5): 655-671.
175. Stadtler et Kilger, 2000. Supply chain management and advanced planning: concepts, models, software and Case Studies. Berlin, Springer.3-540-67682-1.

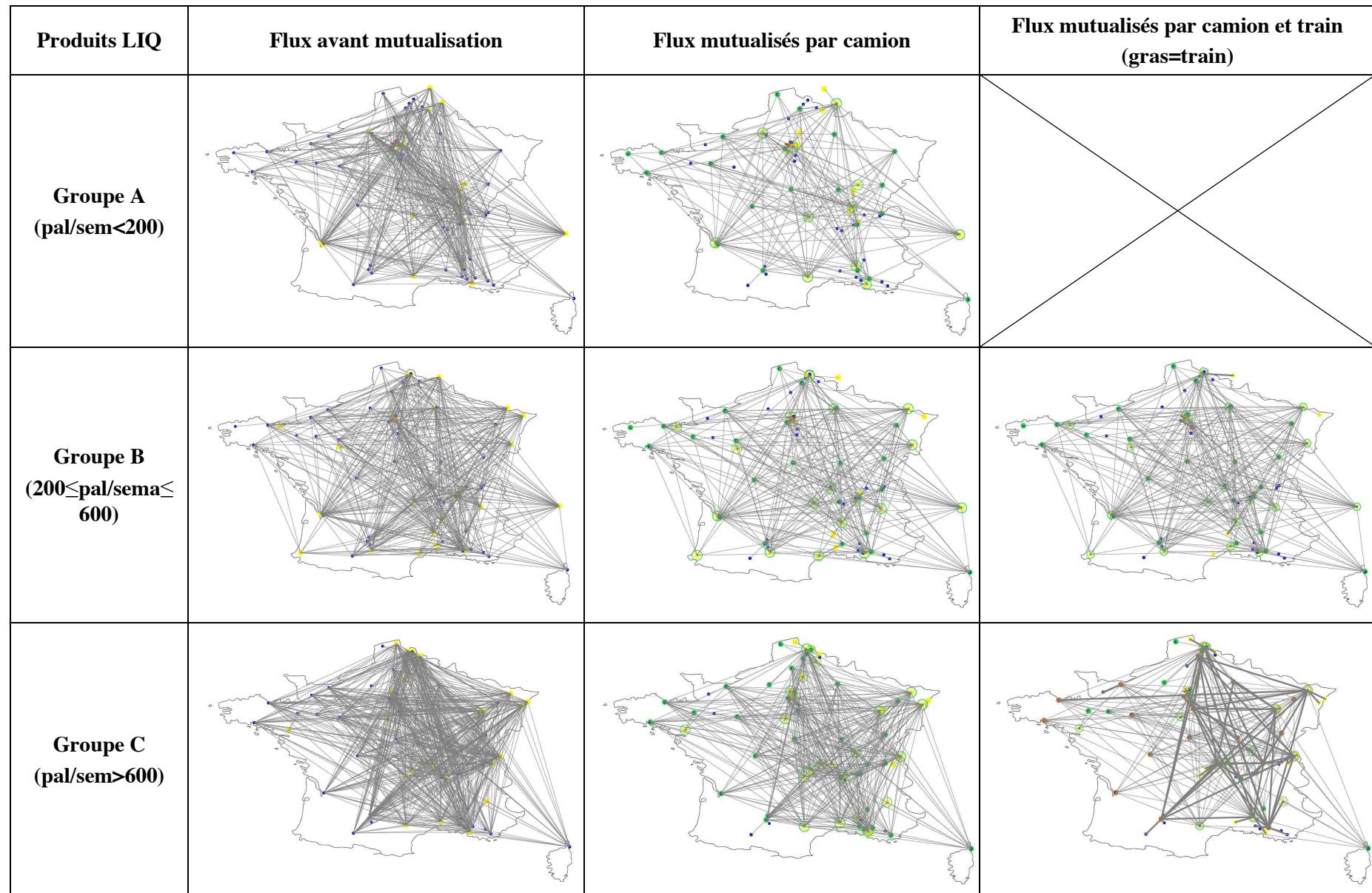
176. Stefanovic, Stefanovic et Radenkovic, 2009. "Supply network modelling and simulation methodology." *Simulation Modelling Practice and Theory*, 17(4): 743-766.
177. Sturm, Keller, André, Steven, Hausberger, Cornelis, Hammarström, Koskinen, McCrae, Pollak, Riemersma, Tartakovski, Zwirin, Soltic et Weilenmann, 2005. Emissions and Fuel Consumption from Heavy Duty Vehicles (Final Report of Action COST346/ARTEMIS). Graz University of Technology, Institute for Internal Combustion, Engines and Thermodynamics.
178. Swaminathan, Smith et Sadeh, 1998. "Modeling Supply Chain Dynamics: A Multiagent Approach*." *Decision Sciences*, 29(3): 607-632.
179. Syam, 2002. "A model and methodologies for the location problem with logistical components." *Computers & Operations Research*, 29(9): 1173-1193.
180. Tan, 2001. "A framework of supply chain management literature." *European Journal of Purchasing & Supply Management*, 7(1): 39-48.
181. Thomas et Griffin, 1996. "Coordinated supply chain management." *European Journal of Operational Research*, 94(1): 1-15.
182. Toth et Vigo, 2002. "Models, relaxations and exact approaches for the capacitated vehicle routing problem." *Discrete Applied Mathematics*, 123(1-3): 487-512.
183. Tuzun et Burke, 1999. "A two-phase tabu search approach to the location routing problem." *European Journal of Operational Research*, 116(1): 87-99.
184. Tyan, Wang et Du, 2003. "An evaluation of freight consolidation policies in global third party logistics." *Omega*, 31(1): 55-62.
185. Ubeda, Arcelus et Faulin, 2010. "Green logistics at Eroski: A case study." *International Journal of Production Economics* (2010), doi:10.1016/j.ijpe.2010.04.041.
186. Uhlig et Gélinas, 1996. La PME et la sous-traitance logistique en Allemagne. Actes du 3° Congrès International Francophone sur la PME, Trois Rivières.
187. WCED, 1987. Our Common Future. World Commission on Environment and Development. Oxford, Oxford University Press
188. Winter, Robert et Sergiu, 2002. Chapter 53 The shapley value. *Handbook of Game Theory with Economic Applications*. Elsevier. Volume 3: 2025-2054.
189. Woodburn, 2003. "A logistical perspective on the potential for modal shift of freight from road to rail in Great Britain." *International Journal of Transport Management*, 1(4): 237-245.
190. Zanni et Bristow, 2009. "Emissions of CO₂ from road freight transport in London: Trends and policies for long run reductions." *Energy Policy*, 38(4): 1774-1786.
191. Zäpfel et Wasner, 2002. "Planning and optimization of hub-and-spoke transportation networks of cooperative third-party logistics providers." *International Journal of Production Economics*, 78(2): 207-220.

9. Annexes

***Annexe 1. Les cartographies des flux avant et après mutualisation
(9 études de cas)***







Annexe 2 : Exemple du questionnaire réalisé sur la plateforme de Carrefour au Mans (pour l'étude de cas des PME fournisseurs)

Annexe 3 : Caractéristiques des flux de deux études réalisées

A. L'étude Déméter (les plus grands fournisseurs de la grande distribution)

Familles de produits	Nombre des sous-familles	Nombre des fournisseurs	Nombre des sites sources	Nombre des PF servies	Nombre des liaisons (par familles)	Distance moyenne /destination (km)	Ecart type de distance /destination	Palettes hétérogènes	Palettes homogènes	Somme en palettes équivalentes	% palettes homogènes	Pal moyens /semaine (pal éq)	Ecart type des pal /semaine	Pal moyens /semaine /destination (pal éq)	Ecart type des pal /semaine /destination
DPH	8	24	30	39	604	377	210	32478,69	285712	309184	92%	25765	3225	21,08	44,39
EP	31	55	81	34	1656	368	212	90599,16	663253	738535	90%	61545	7446	14,2	32,82
LIQ	11	39	80	47	1770	393	214	8158,54	787615	794979	99%	66248	4183	28,38	15,17
Somme	50	118	191	120	4030			131236,39	1736580	1842698		153558		63,66	

B. L'étude FEEF (PME fournisseurs de la grande distribution)

Familles de produits	Nombre des fournisseurs	Nombre des sites sources	Nombre des PF servies	Nombre des liaisons	Distance moyenne /destination (km)	Ecart type de distance /destination	Somme en palettes équivalentes	Pal moyens /semaine (pal éq)	Ecart type des pal /semaine	Pal moyens /semaine /destination (pal éq)	Ecart type des pal /semaine /destination
EP	154	154	5	329	197	97	51488	1560,24	226,25	4,74	6,99

Annexe 4 : Publications acceptées et proceedings

Revue :

1. Shenle Pan, Eric Ballot and Frédéric Fontane. “The reduction of greenhouse gas emissions from freight transport by merging supply chains.” *International Journal of Production Economics*. In Press, Accepted Manuscript. doi: DOI: 10.1016/j.ijpe.2010.10.023

Proceedings :

1. Shenle Pan, Eric Ballot and Frédéric Fontane. “The reduction of greenhouse gas emissions from freight transport by merging supply chains.” *International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM'09)*. Montréal, Canada (2009).
 - The Most Valuable Research Contribution Paper Award in Student Competition
 - The Best Industrial Engineering Research Paper Award of the Conference
2. Shenle Pan, Eric Ballot and Frédéric Fontane. “Minimisation des émissions du transport par mutualisation des schémas logistiques.” *JD-JN-MACS2009*. Angers, France (2009).
3. Shenle Pan, Eric Ballot and Frédéric Fontane. “Environmental and economic challenges regarding the pooling of the supply chains of small businesses: a look at the food industry in Western France.” *International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain*. Casablanca, Morocco (2010).
4. Shenle Pan, Eric Ballot and Frédéric Fontane. “Enjeux environnemental et économique de la mutualisation logistique pour les PME : le cas de l’alimentaire dans l’Ouest de la France.” *MOSIM'10*. Hammamet, Tunisia (2010).
5. Shenle Pan, Eric Ballot and Frédéric Fontane “The reduction of CO₂ emissions from freight transport by pooling supply chains.” *15th European Logistics Association Doctorate Workshop 2010*. Saint-Nazaire, France (2010).

Contribution à la définition et à l'évaluation de la mutualisation de chaînes logistiques pour réduire les émissions de CO₂ du transport : application au cas de la grande distribution

RESUME : Cette recherche se propose de définir et d'évaluer la performance d'une organisation différente de la logistique : la mutualisation. Il s'agit d'une construction entre partenaires indépendants des schémas logistiques qui optimisent leurs chaînes d'approvisionnement ou *supply chains*. Il en résulte une mise en communs de leurs ressources (entrepôts, plateformes, moyens de transport, etc.) et de leurs systèmes à travers la définition des réseaux logistiques mutualisés. L'évaluation de la performance de cette organisation est réalisée en premier lieu sur le plan environnemental à travers les gains en émissions de CO₂ du transport afférant puis économique par les conséquences en coût de ces opérations et la différence avec une optimisation économique. En s'appuyant sur des collaborations avec des organisations logistiques françaises (Club Déméter et FEEF), nous avons effectué deux études, respectivement sur les plus grands fournisseurs et des PME dans le secteur alimentaire de la grande distribution en France. Ainsi, les modèles d'optimisation sur un critère d'émission ou de coût, ont été formalisés et exécutés afin de concevoir les réseaux mutualisés. Les résultats obtenus dans les deux cas démontrent que la mutualisation des schémas logistiques réduit de manière très significative les émissions relatives au transport de marchandises, entre -20% et -50% d'émission de CO₂ en moins suivant les cas. La performance économique est moins remarquable mais également souvent plus favorable que la situation actuelle. Cette performance dépend notamment de l'évolution relative des coûts entre transport ferroviaire et routier, ce qui permet d'explorer les différences de coûts, en présence de taxation par exemple, permettant les meilleures allocations de moyens d'un point de vue environnemental et d'un point de vue économique.

Mots clés : Mutualisation, Emission de CO₂, Transport, Optimisation, Chaîne logistique

Contribution to the reduction of CO₂ emissions from transport by pooling supply chains of fast moving consumer goods

ABSTRACT : This research aims to define and assess the performance of a different logistics organization: the pooling of supply chains. It implies to design a pooled logistics network within several companies by sharing logistics resources (warehouses, distribution centers, transportation means, etc.) and logistics systems, in order to improve supply chains' logistics performance. The performance of this new logistics organization was assessed by two criteria: primarily the environmental criteria measured by the CO₂ emissions from transport and secondly economic consequences measured by the logistics cost. The difference between environment optimization and economic optimization was also examined. Two case studies were conducted in collaboration with French logistical organizations (Club Demeter and FEEF), respectively based on the major food suppliers and the small and medium food suppliers of the fast moving consumer goods in France. The optimization models for transport optimization aiming to minimize CO₂ emissions or logistics cost were formalized and implemented in order to design pooled networks. The results obtained show that the pooling supply chains lead to a significant reduction in CO₂ emissions from transport: between -20% and -50% according to the cases studied. The economic performance is less remarkable, but also often more beneficial than the current situation. This performance depends in particular on the relative evolution of transportation costs between rail and road. For example, carbon taxation could allow a better transport allocation from an environment and an economic standpoint.

Keywords : Pooling, CO₂ emissions, Transportation, Optimization, Supply chain