



**HAL**  
open science

## Planification et ordonnancement des activités dans un centre de crossdock international

Christian Serrano Montero

► **To cite this version:**

Christian Serrano Montero. Planification et ordonnancement des activités dans un centre de crossdock international. Autre. Université de Lyon, 2017. Français. NNT : 2017LYSEM029 . tel-03081286

**HAL Id: tel-03081286**

**<https://theses.hal.science/tel-03081286v1>**

Submitted on 18 Dec 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



N° d'ordre NNT : 2017LYSEM029

**THESE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE LYON**  
opérée au sein de  
**l'Ecole des Mines de Saint-Etienne**

**Ecole Doctorale N° 488**  
**Sciences, Ingénierie, Santé**

**Spécialité de doctorat : Génie industriel**

Thèse soutenue le 16/10/2017, par :  
**Christian SERRANO**

---

**Planification et ordonnancement des  
activités dans un centre de crossdock  
international**

---

Devant le jury composé de :

Lamouri, Samir	Professeur, Arts et Métiers ParisTech	Président
Alpan-Gaujal, Gülgün	Professeure, Institut polytechnique de Grenoble	Rapporteur
Goncalves, Gilles	Professeur, Université d'Artois	Rapporteur
Thierry, Caroline	Professeure, Université Toulouse 2 Le Mirail	Examineur
Nguyen, Alain	Resp. optimisation, Informatique, Renault SAS	Examineur
Dolgui, Alexandre	Professeur, IMT Atlantique	Directeur de thèse
Delorme, Xavier	Professeur, Ecole des Mines de Saint-Etienne	Co-directeur de thèse

Spécialités doctorales	Responsables :	Spécialités doctorales	Responsables
SCIENCES ET GENIE DES MATERIAUX	K. Wolski Directeur de recherche	MATHEMATIQUES APPLIQUEES	O. Roustant, Maître-assistant
MECANIQUE ET INGENIERIE	S. Drapier, professeur	INFORMATIQUE	O. Boissier, Professeur
GENIE DES PROCEDES	F. Gruy, Maître de recherche	IMAGE, VISION, SIGNAL	JC. Pinoli, Professeur
SCIENCES DE LA TERRE	B. Guy, Directeur de recherche	GENIE INDUSTRIEL	X. Delorme, Maître assistant
SCIENCES ET GENIE DE L'ENVIRONNEMENT	D. Graillot, Directeur de recherche	MICROELECTRONIQUE	Ph. Lalevée, Professeur

### EMSE : Enseignants-chercheurs et chercheurs autorisés à diriger des thèses de doctorat (titulaires d'un doctorat d'État ou d'une HDR)

ABSI	Nabil	CR	Génie industriel	CMP
AUGUSTO	Vincent	CR	Image, Vision, Signal	CIS
AVRIL	Stéphane	PR2	Mécanique et ingénierie	CIS
BADEL	Pierre	MA(MDC)	Mécanique et ingénierie	CIS
BALBO	Flavien	PR2	Informatique	FAYOL
BASSEREAU	Jean-François	PR	Sciences et génie des matériaux	SMS
BATTON-HUBERT	Mireille	PR2	Sciences et génie de l'environnement	FAYOL
BEIGBEDER	Michel	MA(MDC)	Informatique	FAYOL
BLAYAC	Sylvain	MA(MDC)	Microélectronique	CMP
BOISSIER	Olivier	PR1	Informatique	FAYOL
BONNEFOY	Olivier	MA(MDC)	Génie des Procédés	SPIN
BORBELY	Andras	MR(DR2)	Sciences et génie des matériaux	SMS
BOUCHER	Xavier	PR2	Génie Industriel	FAYOL
BRODHAG	Christian	DR	Sciences et génie de l'environnement	FAYOL
BRUCHON	Julien	MA(MDC)	Mécanique et ingénierie	SMS
BURLAT	Patrick	PR1	Génie Industriel	FAYOL
CHRISTIE	Frédéric	PR	Science et génie des matériaux	SMS
DAUZERE-PERES	Stéphane	PR1	Génie Industriel	CMP
DEBAYLE	Johan	CR	Image Vision Signal	CIS
DELAFOSSE	David	PR0	Sciences et génie des matériaux	SMS
DELORME	Xavier	MA(MDC)	Génie industriel	FAYOL
DESRAYAUD	Christophe	PR1	Mécanique et ingénierie	SMS
DJENIZIAN	Thierry	PR	Science et génie des matériaux	CMP
DOUCE	Sandrine	PR2	Sciences de gestion	FAYOL
DRAPIER	Sylvain	PR1	Mécanique et ingénierie	SMS
FAVERGEON	Loïc	CR	Génie des Procédés	SPIN
FEILLET	Dominique	PR1	Génie Industriel	CMP
FOREST	Valérie	MA(MDC)	Génie des Procédés	CIS
FOURNIER	Jacques	Ingénieur chercheur CEA	Microélectronique	CMP
FRACZKIEWICZ	Anna	DR	Sciences et génie des matériaux	SMS
GARCIA	Daniel	MR(DR2)	Sciences de la Terre	SPIN
GAVET	Yann	MA(MDC)	Image Vision Signal	CIS
GERINGER	Jean	MA(MDC)	Sciences et génie des matériaux	CIS
GOEURIOT	Dominique	DR	Sciences et génie des matériaux	SMS
GONDRAN	Natacha	MA(MDC)	Sciences et génie de l'environnement	FAYOL
GRAILLOT	Didier	DR	Sciences et génie de l'environnement	SPIN
GROSSEAU	Philippe	DR	Génie des Procédés	SPIN
GRUY	Frédéric	PR1	Génie des Procédés	SPIN
GUY	Bernard	DR	Sciences de la Terre	SPIN
HAN	Woo-Suck	MR	Mécanique et ingénierie	SMS
HERRI	Jean Michel	PR1	Génie des Procédés	SPIN
KERMOUCHE	Guillaume	PR2	Mécanique et Ingénierie	SMS
KLOCKER	Helmut	DR	Sciences et génie des matériaux	SMS
LAFOREST	Valérie	MR(DR2)	Sciences et génie de l'environnement	FAYOL
LERICHE	Rodolphe	CR	Mécanique et ingénierie	FAYOL
MALLIARAS	Georges	PR1	Microélectronique	CMP
MOLIMARD	Jérôme	PR2	Mécanique et ingénierie	CIS
MOUTTE	Jacques	CR	Génie des Procédés	SPIN
NIKOLOVSKI	Jean-Pierre	Ingénieur de recherche	Mécanique et ingénierie	CMP
NORTIER	Patrice	PR1		SPIN
OWENS	Rosin	MA(MDC)	Microélectronique	CMP
PERES	Véronique	MR	Génie des Procédés	SPIN
PICARD	Gauthier	MA(MDC)	Informatique	FAYOL
PIJOLAT	Christophe	PR0	Génie des Procédés	SPIN
PIJOLAT	Michèle	PR1	Génie des Procédés	SPIN
PINOLI	Jean Charles	PR0	Image Vision Signal	CIS
POURCHEZ	Jérémy	MR	Génie des Procédés	CIS
ROBISSON	Bruno	Ingénieur de recherche	Microélectronique	CMP
ROUSSY	Agnès	MA(MDC)	Microélectronique	CMP
ROUSTANT	Olivier	MA(MDC)	Mathématiques appliquées	FAYOL
STOLARZ	Jacques	CR	Sciences et génie des matériaux	SMS
TRIA	Assia	Ingénieur de recherche	Microélectronique	CMP
VALDIVIESO	François	PR2	Sciences et génie des matériaux	SMS
VIRICELLE	Jean Paul	DR	Génie des Procédés	SPIN
WOLSKI	Krzystof	DR	Sciences et génie des matériaux	SMS
XIE	Xiaolan	PR1	Génie industriel	CIS
YUGMA	Gallian	CR	Génie industriel	CMP

Mise à jour : 19/09/2016

**Planification et ordonnancement des activités dans un  
centre de crossdock international**

Christian SERRANO

Thèse de doctorat de l'Université de Lyon, opérée au sein de  
l'Ecole des Mines de Saint-Etienne



A mis padres, por siempre mostrarme el camino, sin imponer nada

A Alejandra, por acompañarme durante estos 4 años

A mis amigos y a mi familia, por su apoyo incondicional



# Table des matières

<b>Table des matières .....</b>	<b>v</b>
<b>Liste des figures .....</b>	<b>ix</b>
<b>Liste de tableaux .....</b>	<b>xi</b>
<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
<b>I. Cadre de recherche et problématique .....</b>	<b>5</b>
<b>1. Contexte de l'industrie automobile et enjeux de l'étude.....</b>	<b>6</b>
1.1. Evolution des modes de production et contexte actuel.....	6
1.2. Internationalisation de l'industrie automobile .....	8
1.3. Rôle des plateformes logistiques et de l'approvisionnement à l'international...	11
1.4. Problématique de recherche et apports .....	14
<b>2. Analyse du cas industriel.....</b>	<b>16</b>
2.1. Fonctionnement et statistiques des AILN Renault.....	16
2.2. Le calendrier de livraison ou Vanning Time Table.....	19
2.3. Planification des flux du réseau logistique AILN.....	20
2.3.1. AILN Renault.....	21
2.3.2. AILN Nissan .....	23
2.4. Ordonnancement et pilotage des activités dans l'atelier AILN.....	26
2.4.1. AILN Renault.....	26
2.4.2. AILN Nissan .....	27
2.5. Impacts des approches de planification et d'ordonnancement dans l'AILN....	29
2.5.1. AILN Renault : analyse théorique .....	29
2.5.2. AILN Renault : réalité sur le terrain.....	32
2.5.3. AILN Nissan : analyse théorique et réalité sur le terrain .....	33
2.6. Problématique industrielle et solution proposée .....	35



<b>3. Etat de l'art.....</b>	<b>37</b>
3.1. Logistique et internationalisation des marchés.....	37
3.2. Les entrepôts et les plateformes crossdock.....	39
3.3. Classification des problèmes autour du crossdocking.....	44
3.4. Configuration du centre de réseau logistique et du centre de crossdock.....	48
3.4.1. Niveau stratégique.....	49
3.4.2. Niveau tactique.....	50
3.4.3. Niveau opérationnel.....	51
3.4.4. Inducteurs de coûts.....	52
3.5. Définition du périmètre de recherche associé au cas industriel étudié.....	53
3.6. Planification des flux dans un centre de crossdock.....	55
3.7. Ordonnancement des activités dans le centre du crossdock.....	62
<b>4. Conclusion partie I.....</b>	<b>69</b>
<b>II. Planification des flux dans un centre de crossdock.....</b>	<b>71</b>
<b>5. Description du problème.....</b>	<b>72</b>
5.1. Hypothèses.....	73
5.2. Caractérisation du problème et comparaison avec la littérature analysée.....	74
5.3. Données d'entrée.....	75
<b>6. Modélisation proposée.....</b>	<b>77</b>
6.1. Variables de décision.....	77
6.2. Formulation mathématique : programmation linéaire en nombres entiers.....	77
6.3. Expérimentations et résultats.....	79
6.3.1. Génération et caractéristiques des instances testées.....	79
6.3.2. Expérimentations.....	82
6.3.3. Analyse de résultats.....	84
6.3.4. Illustration des résultats sur une des instances.....	89
<b>7. Conclusion partie II.....</b>	<b>91</b>

<b>III. Ordonnancement des activités dans un centre de crossdock.....</b>	<b>93</b>
<b>8. Description du problème.....</b>	<b>94</b>
8.1. Hypothèses.....	94
8.2. Caractérisation du problème et comparaison avec la littérature analysée.....	96
8.3. Données d'entrée .....	98
<b>9. Modélisation proposée .....</b>	<b>100</b>
9.1. Variables de décision .....	100
9.2. Formulation mathématique : programmation linéaire en nombres entiers .....	100
9.3. Expérimentations et résultats .....	102
9.3.1. Génération et caractéristiques des instances testées .....	102
9.3.2. Expérimentations et analyse des résultats .....	104
9.3.3. Illustrations des résultats sur une des instances.....	106
<b>10. Conclusion partie III .....</b>	<b>109</b>
<b>IV. Mise en œuvre des modèles proposés .....</b>	<b>111</b>
<b>11. Tests opérationnels sur l'optimisation du transport amont avec CPLEX.....</b>	<b>112</b>
11.1. Adaptation du modèle en programmation linéaire en nombres entiers.....	112
11.2. Déroulement du test et analyse des résultats .....	113
<b>12. Outils Renault sur l'optimisation du chargement.....</b>	<b>118</b>
12.1. La recherche opérationnelle chez Renault.....	118
12.2. Algorithmes d'optimisation du chargement de camions et de conteneurs.....	119
12.3. Prototype d'optimisation du transport amont et du lissage de l'activité.....	120
<b>13. Modèles CPLEX et prototypes Renault : quelques perspectives .....</b>	<b>123</b>
13.1. Sur la planification des flux (Partie II) .....	123
13.2. Sur l'ordonnancement des activités (Partie III) .....	124
<b>14. Conclusion partie IV.....</b>	<b>126</b>
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>127</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>131</b>



## Liste des figures

Figure 1. Ventes de véhicules en 2015, par groupe automobile.....	8
Figure 2. Evolution de la production mondiale de véhicules, par région (1995-2015).....	9
Figure 3. Production mondiale de véhicules, par pays (1990 et 2015).....	10
Figure 4. Implantations industrielles Groupe Renault (Renault, 2016).....	11
Figure 5. Réseau logistique associé à une plateforme logistique AILN .....	17
Figure 6. Flux physiques dans les AILN .....	19
Figure 7. Exemple d'une Vanning Time Table d'une AILN Renault .....	20
Figure 8. Planification des flux du réseau logistique AILN, avec la méthode Renault.....	23
Figure 9. Planification des flux du réseau logistique AILN, avec la méthode Nissan .....	25
Figure 10. Agencement de l'atelier dans les AILN Renault.....	26
Figure 11. Agencement de l'atelier dans les AILN Nissan .....	28
Figure 12. Distribution du programme d'expédition pour une des AILN Renault (volume affecté à chaque jour, par rapport au volume total de la semaine) .....	30
Figure 13. Distribution du programme de réception pour une des AILN Renault (volume affecté à chaque jour, par rapport au volume total de la semaine) .....	31
Figure 14. Comparatif entre les méthodes de planification et d'ordonnancement Renault et Nissan.....	36
Figure 15. Stratégies de distribution et ses caractéristiques principales. Adaptée de Napolitano (2000).....	42
Figure 16. Chronologie des revues de littérature en crossdocking entre 2010 et 2016 .....	44
Figure 17. Problématiques autour du crossdocking étudiée par Boysen & Fliedner (2010).....	46
Figure 18. Problématiques autour du crossdocking (Buijs et al. 2014) .....	48
Figure 19. Classification des centres de crossdock, par type d'industrie (Stephan & Boysen 2011) .....	49
Figure 20. Caractérisation de la problématique # 1 traitée dans cette thèse.....	54
Figure 21. Caractérisation de la problématique # 2 traitée dans cette thèse.....	54
Figure 22. Planification des flux d'un réseau logistique avec un centre de crossdock. Caractérisation de l'approche proposée dans cette thèse.....	72

Figure 23. Approches appliquées à chaque instance étudiée dans la Partie II .....	83
Figure 24. Graphiques des résultats des expérimentations pour l'AILN Renault # 1. Comparatif entre les différentes méthodes de planification .....	86
Figure 25. Graphiques des résultats des expérimentations pour l'AILN Renault # 2. Comparatif entre les différentes méthodes de planification .....	88
Figure 26. Analyse détaillée des résultats de l'approche proposée, pour la semaine 2 de la plateforme # 2.....	90
Figure 27. Ordonnancement de camions et des opérations dans l'atelier dans un centre de crossdock. Caractérisation de l'approche proposée dans cette thèse .....	94
Figure 28. Zones et flux dans l'atelier du centre de crossdock considéré.....	96
Figure 29. Analyse détaillée des résultats de l'approche proposée dans la Partie III .....	107
Figure 30. Analyse détaillée sur les résultats de l'approche proposée dans la Partie III. ....	108
Figure 31. Procédure des tests opérationnels sur le transport amont .....	114
Figure 32. Exemple du test d'optimisation du transport amont. Comparaison entre la méthode Renault, la méthode proposée et les résultats réels.....	116
Figure 33. Synthèse des résultats du test sur le transport amont pour l'AILN Renault # 1, en utilisant CPLEX .....	116
Figure 34. Fonctionnements des prototypes d'optimisation de chargement chez Renault.....	119
Figure 35. Résultats de l'évaluation des approximations du modèle proposé en utilisant les outils d'optimisation de chargement disponibles chez Renault .....	120
Figure 36. Fonctionnements du prototype d'optimisation du programme de réception et lissage de l'activité AILN.....	121
Figure 37. Comparaison entre le programme de réception généré par le système d'information Renault et celui proposé par le nouvel outil d'optimisation .....	122
Figure 38. Synthèse des résultats du test sur le transport amont pour l'AILN Renault # 1, en utilisant le nouvel outil d'optimisation.....	122
Figure 39. Combinaison des modèles en programmation linéaire et des outils d'optimisation Renault, pour la planification des flux du centre de crossdock.....	124
Figure 40. Combinaison des modèles en programmation linéaire et des outils d'optimisation Renault,, pour la planification et l'ordonnancement des activités du centre de crossdock.....	125
Figure 41. Synthèse des approches proposées dans cette thèse .....	129

## Liste de tableaux

Tableau 1. Activité des plateformes AILN Renault en 2015 (Renault, 2016).....	13
Tableau 2. Caractérisation et statistiques des AILN Renault .....	18
Tableau 3. Planification des flux dans les AILN Renault. Exemple pour un composant demandé par deux clients différents.....	22
Tableau 4. Planification des flux dans les AILN Nissan. Exemple pour un composant demandé par un client .....	24
Tableau 5. Programme d'expédition pour 4 clients différents. Volumétrie (m <sup>3</sup> ) par jour.....	30
Tableau 6. Programme de réception pour 7 circuits de transport .....	32
Tableau 7. Indicateurs de performance, transport amont et aval, AILN Renault France.....	33
Tableau 8. Indicateurs de performance, transport amont et aval, AILN Nissan Japon.....	35
Tableau 9. Bénéfices du crossdocking (Saddle Creek Logistics Services 2011).....	43
Tableau 10. Classification des problématiques autour du crossdocking et sa recherche future (Agustina et al. 2010) .....	45
Tableau 11. Problématiques opérationnelles autour du crossdocking présentées par Ladier & Alpan (2016).....	47
Tableau 12. Caractérisation des articles analysés (1999 à 2008) traitant la planification des flux dans un réseau logistique avec des centres de crossdock.....	60
Tableau 13. Caractérisation des articles analysés (2008 à 2017) traitant la planification des flux dans un réseau logistique avec des centres de crossdock.....	61
Tableau 14. Caractérisation des articles analysés (2004 à 2011) traitant l'ordonnancement des activités dans un centre de crossdock .....	67
Tableau 15. Caractérisation des articles analysés (2011 à 2017) traitant l'ordonnancement des activités dans un centre de crossdock .....	68
Tableau 16. Caractérisation du problème de planification des flux dans un réseau logistique avec des centres de crossdock, traité dans cette thèse.....	74
Tableau 17. Taille des instances utilisées dans les expérimentations dans la Partie II.....	80
Tableau 18. Paramètres liés aux capacités du réseau logistique et aux capacités internes des plateformes crossdock étudiées dans la Partie II .....	81

Tableau 19. Paramètres liés aux coûts des activités du réseau logistique et aux coûts internes des plateformes crossdock étudiées dans la Partie II.....	81
Tableau 20. Paramètres liés à la charge de travail dans l’atelier des plateformes crossdock étudiées dans la Partie II.....	82
Tableau 21. Statistiques sur les expérimentations dans CPLEX pour la méthode proposée dans la Partie II.....	83
Tableau 22. Résultats des expérimentations des trois méthodes étudiées, pour l’AILN Renault # 1.....	85
Tableau 23. Réduction des coûts obtenue avec l’approche proposée, vis-à-vis des méthodes Renault, pour les expérimentations de la plateforme # 1 .....	85
Tableau 24. Résultats des expérimentations pour l’AILN Renault # 2. ....	87
Tableau 25. Réduction des coûts obtenue avec l’approche proposée, vis-à-vis des méthodes Renault, pour les expérimentations de la plateforme # 2 .....	87
Tableau 26. Illustration sur le processus d’agrégation de composants en type de produits.....	95
Tableau 27. Caractérisation du problème d’ordonnancement de camions et des opérations dans l’atelier dans un centre de crossdock, traité dans cette thèse.....	97
Tableau 28. Taille des instances utilisées pour les expérimentations dans la Partie III .....	103
Tableau 29. Paramètres liés aux capacités du réseau logistique, aux capacités internes et à l’inducteur de coût des plateformes crossdock étudiées dans la Partie III .....	104
Tableau 30. Paramètres liés à la charge de travail dans l’atelier des crossdocks étudiées dans la Partie III .....	104
Tableau 31. Statistiques sur les expérimentations dans CPLEX pour la méthode proposée dans la Partie III .....	105
Tableau 32. Exemple du test d’optimisation du transport amont pour un circuit avec un fournisseur, comparaison entre la méthode Renault et la méthode proposée .....	115
Tableau 33. Illustration de la modification du programme de réception dans les tests opérationnels.....	115

# Introduction générale

Avec presque 90 millions de voitures vendues dans le monde en 2015 (OICA 2015), l'industrie automobile se positionne au cœur du développement socio-économique mondial. Ceci n'est pas nouveau : depuis plus d'un siècle les constructeurs automobiles sont à l'avant-garde des nouvelles techniques de production et de management, qui se propagent à d'autres industries. Ces nouveaux concepts entraînent des fortes transformations à l'intérieur de l'usine, mais pour réellement profiter des bénéfices attendus, l'ensemble des outils et des acteurs de la chaîne logistique doit évoluer.

En parallèle aux transformations des techniques de production, ces dernières décennies l'industrie automobile a fortement internationalisé ses opérations, afin de conquérir des marchés émergents, comme la Chine et la Russie. Le déploiement d'un nouveau site de fabrication en dehors de sa zone géographique d'influence, représente un défi majeur pour un constructeur automobile, en particulier en termes d'approvisionnement des pièces de première monte. Faute d'un réseau de fournisseurs implanté à proximité, les nouvelles usines doivent s'approvisionner, en partie, auprès de fournisseurs lointains, en dehors même du continent. Inversement, les pays émergents deviennent d'importants fabricants de composants et représentent une alternative d'approvisionnement intéressante en termes de coût. Ainsi, les constructeurs automobiles élargissent et diversifient leur panel de fournisseurs. Dans ce cadre, supportés par un transport maritime solidement développé et peu coûteux par rapport à d'autres moyens, les flux internationaux de pièces ont fortement augmenté ces dernières années.

Ainsi, l'évolution des modes de production, conjuguée avec un environnement économique davantage globalisé, génèrent des nouveaux défis pour le management de la chaîne logistique parmi lesquels ceux liés aux approvisionnements à longue distance. Lim (2014) étudie les impacts du rallongement des délais d'approvisionnement sur la planification industrielle et commerciale et en propose une nouvelle approche afin d'améliorer le compromis entre coûts logistiques, exigences commerciales et satisfaction client. Nous nous intéressons plutôt au parcours logistique des pièces (entre le fournisseur et les usines), sans remettre en cause la méthode de planification qui déclenche les besoins pièces. Dans ce contexte, afin de mieux maîtriser les approvisionnements à longue distance, les constructeurs automobiles s'appuient sur des plateformes logistiques d'exportation de pièces, positionnées entre les usines de montage de véhicules lointaines et les fournisseurs à proximité des plateformes. Elles sont en charge, dans un premier temps, de la gestion du flux d'information : intégration de la demande des usines, consolidation et passation des commandes de pièces auprès des fournisseurs. Deuxièmement, elles sont responsables des flux physiques : réception, traitement, consolidation et expédition des pièces vers chacun de ses clients.



De nombreuses contraintes sont associées au fonctionnement des plateformes logistiques d'exportation de pièces : la fréquence d'expression et la variabilité des besoins des usines, la fréquence et les changements de modes de transport, la capacité des fournisseurs, la capacité de la plateforme en surface et ressource humaine, des contraintes fiscales et douanières, entre autres. En particulier, la planification et le pilotage des opérations relèvent des enjeux d'optimisation, à savoir : la minimisation des surfaces, de la main d'œuvre, du temps de transit des colis et la maximisation du taux de remplissage des moyens de transport.

Ces plateformes fonctionnent principalement comme des centres de crossdock. Utilisée initialement à grande échelle par les détaillants (en particulier Walmart), cette stratégie logistique est exploitée actuellement dans presque toutes les industries (Ertek 2005) et suscite aussi beaucoup d'attention dans le management de la chaîne logistique (Shaolong 2007). Le principe d'un centre de crossdock est simple : recevoir des produits en provenance d'un ensemble de fournisseurs, les trier et les consolider pour les envoyer vers un ensemble de clients, le tout avec un minimum de temps de transit. Dans un environnement économique de forte concurrence, avec des clients de plus en plus exigeants, le crossdocking permet aux entreprises d'accélérer les flux logistiques, en minimisant le niveau de stock et en optimisant le coût du transport, grâce à la consolidation des produits. Il est important de remarquer que l'absence d'un stock tampon dans le crossdock demande un degré de synchronisation très élevé, non seulement entre les opérations internes de la plateforme, mais aussi avec le réseau logistique associé.

Depuis une dizaine d'années la planification des flux dans un centre crossdock connaît un intérêt grandissant auprès de la recherche académique. Des sujets comme l'optimisation des réseaux de distribution ou l'ordonnancement ont été adaptés, avec des nouvelles approches pour répondre aux problématiques du crossdocking. L'interdépendance entre les opérations internes (comme l'ordonnancement des arrivées/départs et le transfert des colis) et les activités externes (comme la planification du réseau de transport) reste un sujet majeur dans l'optimisation des activités dans les centres de crossdock. D'autre part, le cas d'étude traité dans cette thèse rajoute certaines caractéristiques particulières aux plateformes logistiques dans l'industrie automobile, comme le reconditionnement des emballages (que nous appellerons repackaging tout au long de la thèse), la fréquence du transport maritime ou encore la diversité de types de colis.

Dans ce cadre, notre problématique de recherche est la suivante : comment optimiser la planification et le pilotage des activités dans une plateforme crossdock en intégrant les contraintes liées au réseau de distribution et les caractéristiques propres aux plateformes d'exportation des pièces du secteur automobile ? L'objectif de notre recherche est de proposer des modèles innovants à ce propos, ainsi qu'une approche globale pour planifier l'ensemble des opérations associées au centre de crossdocking.

Le travail présenté dans cette thèse est le fruit de trois ans de recherche pour l'obtention du titre de Docteur en Sciences, Ingénierie et Santé, avec une spécialité en Génie Industriel, de l'Université de Lyon, opérée au sein de l'École Nationale des Mines de Saint-Etienne. Cette thèse s'inscrit dans le cadre d'un partenariat académique-industriel entre le laboratoire LIMOS (Laboratoire d'Informatique, de Modélisation et d'Optimisation des Systèmes) et le constructeur automobile Renault, sous la convention CIFRE n°2013/276 (Convention Industrielle de Financement par la Recherche) régie par l'Association Nationale pour la Recherche en Technologie (ANRT). Les attendus de l'industriel sont : (1) une étude benchmark des problématiques similaires dans d'autres industries ; (2) une analyse détaillée de la situation actuelle des plateformes logistiques Renault, en termes d'inducteurs de coûts, contraintes et paramètres leviers ; (3) une proposition des modèles et approches pour optimiser la planification et le pilotage des plateformes logistiques. En effet, sur la base des résultats des expérimentations théoriques et des tests opérationnels de nos modèles, un nouveau processus de planification est en cours de développement et sera mis en place à moyen terme dans les plateformes logistiques Renault. Nous avons également travaillé avec les plateformes logistiques Nissan, partenaire de Renault, notamment avec une étude approfondie de sa situation actuelle. Un ensemble de best practices a été identifié et inclus dans la solution que nous proposons, laquelle pourrait être appliquée chez Nissan. Plus généralement, ces travaux contribuent à la recherche sur la planification et la synchronisation des activités dans un centre de crossdock. Nous considérons que les modèles et l'approche proposés restent suffisamment génériques, permettant d'être adaptés à d'autres configurations, modes de fonctionnement et industries.

La thèse est composée de quatre parties et quatorze chapitres. La première partie est consacrée au cadre de recherche et la problématique traitée, avec un chapitre focalisé sur le contexte de l'industrie automobile, un chapitre d'analyse sur le cas industriel étudié (Renault et Nissan) et finalement un chapitre qui présente une revue de la littérature associée à la problématique identifiée. La deuxième partie de cette thèse traite le sujet de la planification des flux dans une plateforme crossdock. Suite à la description détaillée du problème, nous présentons la modélisation proposée, basée sur la programmation linéaire en nombres entiers. Ensuite, les résultats des expérimentations et leur analyse y sont abordés. La troisième partie se focalise sur l'ordonnancement des activités dans le centre de crossdock. Avec la même structure de la deuxième partie, nous présentons la description du problème, le programme linéaire en nombres entiers, les expérimentations et l'analyse des résultats. La quatrième partie du document présente le travail effectué sur la mise en œuvre chez Renault des approches proposées, qui a consisté principalement à la réalisation de tests opérationnels, combinant la programmation linéaire et des outils d'optimisation de chargement. Chacune des parties comporte un chapitre avec des conclusions et des perspectives. Les conclusions générales sont présentées à la fin de la thèse, tout comme une bibliographie.

Cette thèse a fait l'objet de plusieurs publications et présentations, récapitulées ci-dessous :

- Publications dans des revues internationales avec comité de lecture :
  - Serrano, C., Delorme, X. & Dolgui, A., 2017. Crossdocking distribution and operation planning: a case of study in the automotive industry. *Production Planning & Control*. Soumis.
  - Serrano, C., Delorme, X. & Dolgui, A., 2016. Scheduling of truck arrivals, truck departures and shop-floor operation in a crossdock platform, based on outbound trucks loading plan. *International Journal of Production Economics*. En révision.
  
- Publications dans des conférences internationales avec comité de lecture :
  - Serrano, C., Delorme, X. & Dolgui, A., 2017. Truck scheduling at a crossdock center with repackaging operation. *In 24th International Conference on Production Research*. Poznan, Pologne. Accepté.
  - Serrano, C., Delorme, X. & Dolgui, A., 2016. Scheduling of inbound truck arrivals and shop-floor operation in a cross-dock platform, based on outbound trucks loading plan. *Nineteenth International Working Seminar on Production Economics. Pre-prints Volume 3*. Innsbruck, Austria.
  - C. Serrano, J. Moral, X. Delorme, A. Dolgui. 2016. Crossdocking operation scheduling: truck arrivals, shop-floor activities and truck departures. *In 8th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control, MIM 2016*. Troyes, France. IFAC-PapersOnLine, 49(12), 1353-1358. Elsevier, ISSN 2405-8963.
  - Serrano, C., Delorme, X. & Dolgui, A., 2015. Distribution and operation planning at a crossdock platform: A case of study at Renault. *In Proceedings of 4th IEEE International Conference on Advanced Logistics and Transport*. IEEE, 193-198. Valenciennes, France.
  
- Publications dans des conférences nationales :
  - Serrano, C., Delorme, X. & Dolgui, A., 2015. Programmation des activités dans une plateforme crossdock internationale. *16ème congrès de la Société Française de Recherche Opérationnelle et Aide à la Décision (ROADEF)*. Marseille, France.

# I. Cadre de recherche et problématique

<b>1. Contexte de l'industrie automobile et enjeux de l'étude.....</b>	<b>6</b>
1.1. Evolution des modes de production et contexte actuel.....	6
1.2. Internationalisation de l'industrie automobile .....	8
1.3. Rôle des plateformes logistiques et de l'approvisionnement à l'international...	11
1.4. Problématique de recherche et apports .....	14
<b>2. Analyse du cas industriel.....</b>	<b>16</b>
2.1. Fonctionnement et statistiques des AILN Renault.....	16
2.2. Le calendrier de livraison ou Vanning Time Table .....	19
2.3. Planification des flux du réseau logistique AILN.....	20
2.4. Ordonnancement et pilotage des activités dans l'atelier AILN.....	26
2.5. Impacts des approches de planification et d'ordonnancement dans l'AILN....	29
2.6. Problématique industrielle et solution proposée .....	35
<b>3. Etat de l'art .....</b>	<b>37</b>
3.1. Logistique et internationalisation des marchés .....	37
3.2. Les entrepôts et les plateformes crossdock.....	39
3.3. Classification des problèmes autour du crossdocking.....	44
3.4. Configuration du centre de réseau logistique et du centre de crossdock.....	48
3.5. Définition du périmètre de recherche associé au cas industriel étudié .....	53
3.6. Planification des flux dans un centre de crossdock .....	55
3.7. Ordonnancement des activités dans le centre du crossdock. ....	62
<b>4. Conclusion partie I .....</b>	<b>69</b>

## 1. Contexte de l'industrie automobile et enjeux de l'étude

Dans ce premier chapitre nous commençons par un récapitulatif sur l'évolution des modes de production dans l'industrie automobile et son contexte actuel. Le phénomène d'internationalisation de l'industrie est exposé en deuxième. Nous présentons en troisième partie les nouveaux enjeux associés à la chaîne logistique, notamment en termes de gestion des approvisionnements à l'international et dans ce contexte, la raison d'être des plateformes logistiques. Sur cette base, nous définissons la problématique de recherche associée et nous présentons notre contribution pour y apporter une solution.

### 1.1. Evolution des modes de production et contexte actuel

Les résultats de *l'International Motor Vehicle Program*, une étude académique et de terrain qui vise à comprendre l'évolution de l'industrie automobile, sont présentés dans Womack & Jones (2007). Toutes les activités nécessaires pour la production d'un véhicule y sont approfondies : étude de marché, design, ingénierie, chaîne logistique, opération des usines, vente et après-vente. Sur la base de ce travail, nous présentons ci-dessous la synthèse des trois principales phases de l'évolution des modes de production de véhicules et ses caractéristiques, pour la période entre la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle et la fin du XX<sup>ème</sup> :

- La production artisanale utilise des opérateurs qualifiés, polyvalents et des outils simples mais flexibles. Des demandes très spécifiques de la part du client peuvent être intégrées, donnant lieu à des véhicules très personnalisés. Cette méthode de production a vu naître, en 1895, le premier véhicule commercialisé avec succès, par la compagnie française Panhard & Levassor. A ce moment, la voiture restait un bien de luxe, accessible à peu de personnes. Au début des années 1900, plus d'une centaine de compagnies avaient rejoint l'industrie automobile, avec une production artisanale à faible cadence (mille voitures par an maximum). Aujourd'hui certains constructeurs, comme Aston Martin, gardent certains principes de ces techniques et offrent des véhicules très personnalisés, avec des quantités faibles pour chaque modèle.
- La production de masse retrouve ses origines dans le modèle Ford T, produit en série à partir de 1908 à Detroit, USA. Le grand levier d'innovation de Ford a été le développement des composants totalement interchangeables, avec une grande facilité à s'attacher entre eux. Ce facteur, combiné avec l'application de la nouvelle méthode sur l'organisation scientifique du travail impulsée par Frederick W. Taylor, ont permis de mettre en place une *ligne d'assemblage*. Originellement statique, la ligne d'assemblage est devenue mobile. Ainsi, la voiture passait par les différents postes de travail où une opération simple et rapide était réalisée. En 1914, cette méthode de production montrait déjà une réduction du temps d'assemblage de 88% par

rapport aux techniques artisanales. Le niveau de personnalisation est réduit au minimum et les voitures étaient produites sur stock et mises à disposition des clients à partir de ces stocks. Conscients des avantages de cette économie d'échelle, la plupart des constructeurs adoptent le Fordisme. Ainsi, la voiture devient davantage un produit accessible aux classes moyennes dans les pays industrialisés.

- La production *lean* ou production de masse diversifiée est concrètement appliquée au Japon dans les années 1960, avec Toyota comme pionnier. Ces nouvelles techniques répondaient aux conditions économiques et sociales du pays, qui étaient considérablement différentes de celles des Etats-Unis : une demande de véhicules faible, mais assez diversifiée, des lois du travail plus restrictives, une main d'œuvre mieux organisée autour des syndicats et une impossibilité d'acquérir les machines utilisées par les constructeurs occidentaux. La production de masse n'était pas viable dans ces conditions et Toyota a développé une méthodologie applicable à tous les secteurs de l'entreprise. Dans l'usine, des techniques comme le changement rapide d'outils et le juste-à-temps ont permis de gagner en flexibilité. De plus, une nette amélioration de la productivité a été possible grâce à une philosophie zéro défaut dès le départ, au lieu de consacrer du temps à corriger des erreurs. Ainsi, la production de masse traditionnelle décline pendant la deuxième partie du siècle, les années 80 étant généralement considérées comme la fin de cette technique, telle qu'elle avait été conçue par Ford. Nous orientons les lecteurs intéressés vers Kaneko & Nojiri (2008), qui présentent une étude sur la relation entre les fournisseurs et les constructeur au Japon, vis-à-vis de la logistique Juste-à-Temps.

Vers la fin du XX<sup>ème</sup> siècle l'environnement économique est devenu fortement concurrentiel, avec des consommateurs de plus en plus exigeants en termes de coût, de qualité et de délais. En parallèle, une nouvelle composante s'est renforcée : offrir un très haut niveau de personnalisation est aujourd'hui impératif pour attirer les clients. Le mode de production a dû encore évoluer et cette nouvelle phase est nommée *personnalisation de masse*. Pour y arriver, l'appareil industriel doit devenir davantage flexible, notamment impulsé par une meilleure intégration de la chaîne logistique et l'exploitation des évolutions des technologies de l'information (MacCarthy et al. 2003).

Dans ce contexte, l'industrie automobile se consolide aujourd'hui comme un des secteurs majeurs du développement économique et social des marchés mondiaux et l'année dernière les ventes des véhicules ont atteint presque 90 millions de voitures. La Figure 1 présente le classement de six premiers groupes automobiles en 2015, par rapport au volume de ventes.

Avec plus de 118 ans d'histoire, le Groupe Renault<sup>1</sup> est l'un des acteurs majeurs de cette industrie. Présent dans 127 pays, le constructeur généraliste français compte plus de 120 000 collaborateurs et fabrique des véhicules et des organes dans 36 sites de fabrication. Trois axes majeurs portent la stratégie du Groupe : (1) la conception de produits et services innovants et accessibles à tous ; (2) l'engagement en faveur d'une mobilité durable, avec comme principal levier le véhicule électrique et (3) le développement d'une croissance internationale rentable et constante. En 1999, Renault et Nissan sont devenus partenaires industriels. Aujourd'hui, avec plus de 8,5 millions de voitures vendus en 2015, l'Alliance Renault-Nissan se consolide comme le 4<sup>ème</sup> groupe automobile mondial. Dans la recherche croissante de synergies, depuis 2014 quatre domaines clés font l'objet d'un plan de convergence ambitieux : l'ingénierie, la fabrication et la logistique, les achats, les ressources humaines. Par exemple, la Direction de la Supply Chain regroupe aujourd'hui les équipes des deux compagnies au sein d'une structure commune *Alliance*, afin de partager les meilleures pratiques, de profiter des appels d'offre communs et de favoriser l'utilisation croisée des infrastructures logistiques.

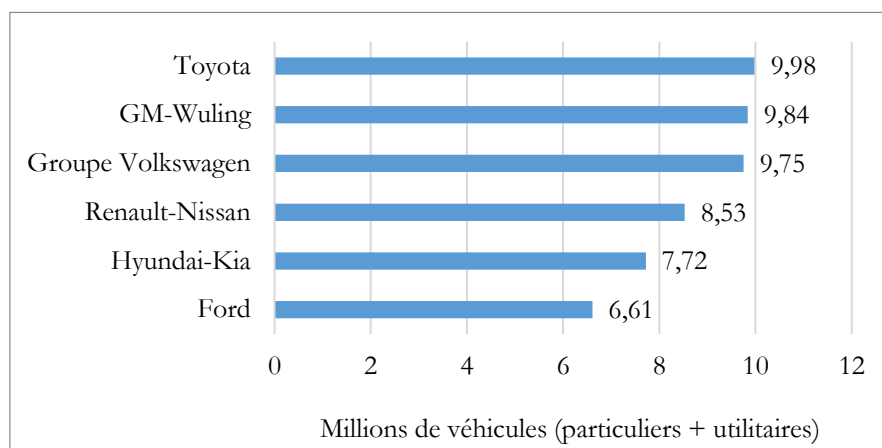


Figure 1. Ventes de véhicules en 2015, par groupe automobile

## 1.2. Internationalisation de l'industrie automobile

Al-Rodhan (2006) définit le phénomène de mondialisation comme « le processus qui regroupe les causes, la trajectoire et les conséquences de l'intégration transnationale et transculturelle des activités humaines et non-humaines ». Sur l'aspect économique, depuis plusieurs décennies les entreprises se délocalisent en cherchant des avantages compétitifs, notamment pour profiter des coûts de production plus bas ou pour pénétrer sur des nouveaux marchés. Bonturi & Fukasaku (1993) étudient l'évolution du commerce international, sous les angles intra-entreprises et inter-entreprises. Ils remarquent une

---

<sup>1</sup> Les statistiques et les informations présentées dans la suite du paragraphe sont extraites de l'Atlas Renault (Renault, 2016).

interdépendance croissante des marchés et des appareils productifs au niveau mondial. Cette internationalisation est épaulée par les avancées technologiques, les évolutions des moyens de transport et l'allègement des barrières économiques entre les pays ; sans parler de l'explosion des marchés émergents, comme le Brésil, la Chine et la Russie.

Le secteur de l'automobile n'a pas échappé au phénomène d'internationalisation. Au contraire, les constructeurs s'orientent de plus en plus vers des systèmes de production et des chaînes logistiques globaux (Fleischmann et al. 2006) et leurs capacités de production en dehors de leur zone géographique d'origine ont sensiblement augmentées. Selon Humphrey (2003), quatre principaux enjeux y attirent les constructeurs : (1) la perspective, à court terme, d'une augmentation des ventes sur les nouveaux marchés, (2) la perspective, à long terme, d'une croissance constante, liée aux économies ayant des niveaux de motorisation à puissance faible, (3) une réduction des coûts de production obtenue grâce à une intégration locale dans un environnement de fabrication *low-cost* et (4) une réduction des coûts de conception des véhicules liée à la diversification des marchés. La Figure 2 montre l'évolution géographique de la production des véhicules des 20 dernières années. L'Amérique du Nord et l'Europe de l'Ouest ont diminué leur activité de production et c'est en Amérique du Sud, en Europe de l'Est et surtout en Chine, où la production de véhicules a augmenté. Plus concrètement, en 1990, 8 pays produisaient presque 85% des voitures, contre 12 pays en 2015, comme le montre la Figure 3.

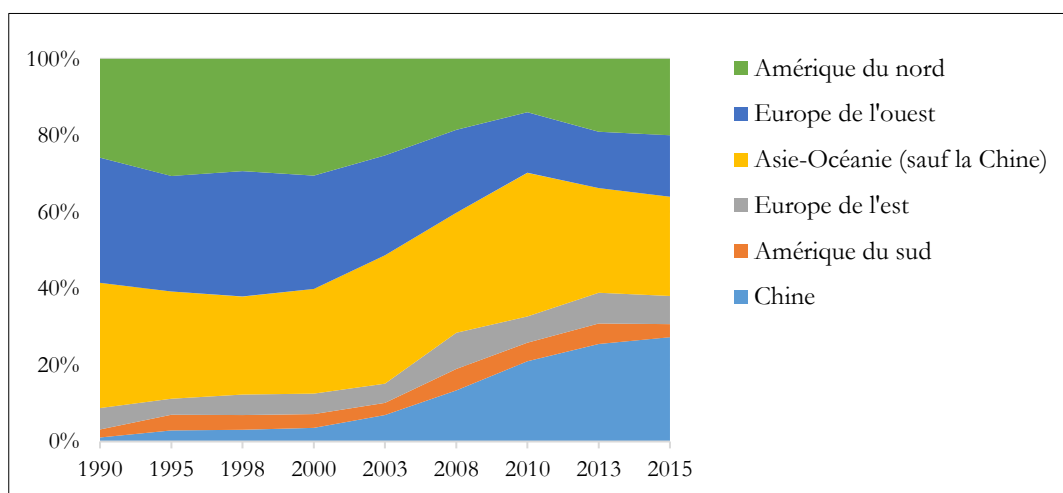


Figure 2. Evolution de la production mondiale de véhicules, par région (1995-2015)<sup>2</sup>

<sup>2</sup> À partir des statistiques de l'OICA (Organisation Internationale des Constructeurs Automobiles).



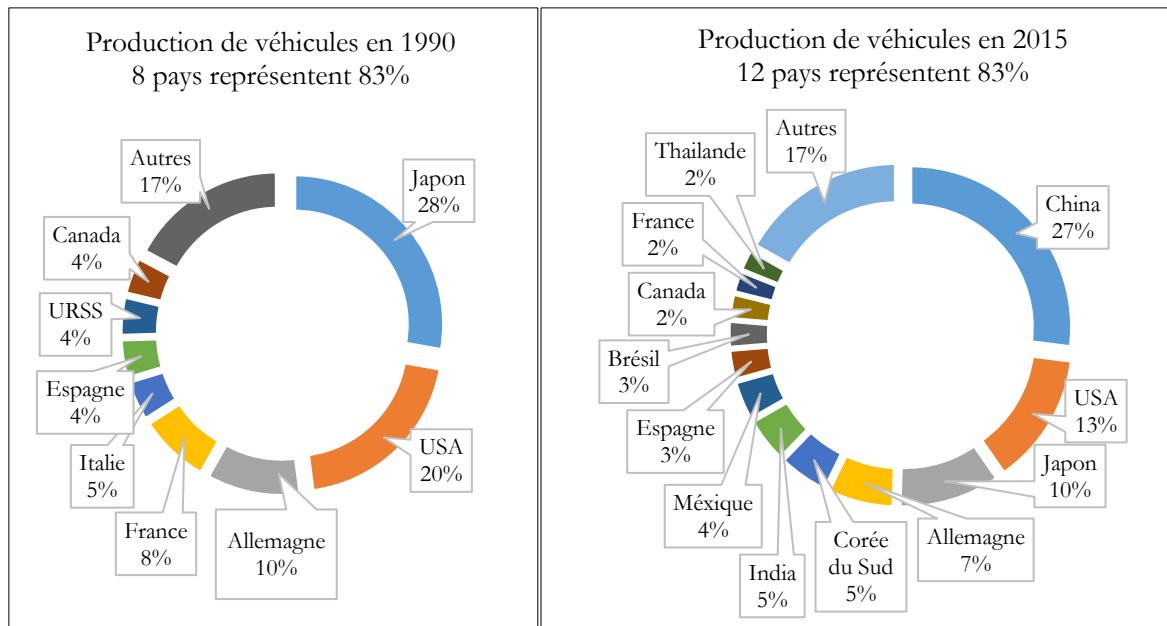


Figure 3. Production mondiale de véhicules, par pays (1990 et 2015)<sup>2</sup>

L'industrie automobile est un secteur avec des caractéristiques très particulières qui font que le phénomène d'internationalisation retrouve des bases et des enjeux qui diffèrent des autres industries<sup>3</sup>. D'une part, des éléments externes comme les barrières politiques et les spécificités de la demande de chaque marché, font que l'assemblage final des véhicules doit être réalisé, en général, près du consommateur final. En revanche, la région d'origine du constructeur joue encore un rôle clé dans la production des organes mécaniques (moteurs et boîtes de vitesses). D'autre part, des aspects internes liés au produit (le véhicule) contraignent l'organisation et la localisation des fournisseurs associés à sa fabrication, par exemple : (1) une voiture est un produit complexe, avec des milliers de composants et sa fabrication nécessite des opérations très variées ; (2) avec un degré d'innovation très important.

Le développement à l'international est au cœur de la stratégie de Renault<sup>4</sup> depuis une dizaine d'années. Son résultat peut être constaté dans la Figure 4, qui présente la cartographie des implantations industrielles de Renault, fin 2015. Ainsi, la proportion des ventes en dehors de l'Europe est passée de 23% à 51% entre 2004 et 2013. Cette proportion a connu une diminution les deux dernières années (2014 et 2015), principalement à cause de la baisse des marchés russe et brésilien. En 2015 elle s'est située à hauteur de 42%. Concernant l'activité de production, nous pouvons constater que 11 des 20 usines de véhicules sont implantées en dehors de la région Europe (telle qu'elle est définie par l'entreprise). Les usines *étrangères* ont fabriqué 56%

<sup>3</sup> Nous orientons le lecteur intéressé par une analyse poussée sur la globalisation de l'industrie automobile vers Frigant & Zumpe (2014) et Sturgeon et al. (2009).

<sup>4</sup> Les statistiques et les informations présentées dans la suite du paragraphe ont été récupérées de l'Atlas Renault (Renault, 2016).

des véhicules produits par Renault en 2015 (contre 42% des ventes dans ces marchés). Concernant les usines de mécanique, 8 se trouvent en Europe, contre 6 en dehors de cette région. Malgré une répartition équilibrée, la production des organes est faite dans les deux tiers des cas dans une usine de la région Europe. Des approvisionnements à longue distance sont donc nécessaires pour assurer la fabrication des véhicules dans les usines en dehors de cette région. De plus, un nombre important de fournisseurs externes restent installés sur le continent européen.

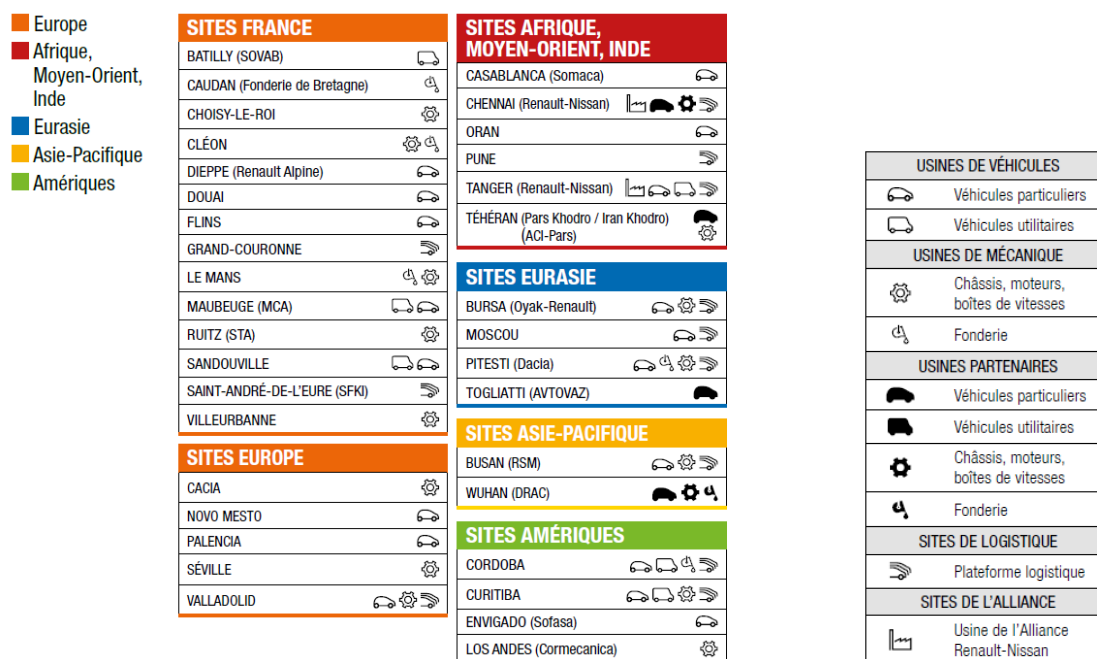


Figure 4. Implantations industrielles Groupe Renault (Renault, 2016)

### 1.3. Rôle des plateformes logistiques et de l'approvisionnement à l'international

Les différentes transformations dans l'industrie automobile, décrites dans les deux sections précédentes, se traduisent par des nouveaux défis pour ses chaînes logistiques. Nous identifions trois aspects principaux : (1) la production *lean*, avec des concepts comme le Juste-à-Temps, conçoit une chaîne logistique avec des niveaux de stock minimes, voire nuls. (2) Depuis le passage à la *personnalisation de masse*, la diversité de produits et de composants augmente considérablement, complexifiant davantage la gestion des approvisionnements. (3) L'internationalisation de l'activité a généré une augmentation des flux logistiques outre-mer, impactant d'une part, la programmation de fabrication des véhicules, et d'autre part, la gestion des flux logistiques, avec des nouveaux enjeux comme le management des fournisseurs lointains, la gestion douanière, les appels d'offre du transport maritime et les assurances. Dans ce contexte, le management de la chaîne logistique joue aujourd'hui un rôle stratégique dans l'industrie automobile. Il s'agit en effet d'un domaine qui a reçu beaucoup d'attention dans le milieu académique. Deux des sujets les plus étudiés concernent, selon González-Benito et al. (2013) :

(1) les stratégies de coopération et intégration des acteurs de la chaîne logistique comme levier de performance et (2) des modèles pour la planification et l'ordonnancement dans la fabrication et la logistique. Le contexte des plateformes logistiques internationales (diversité d'acteurs, de types de transport et d'objectifs de réduction de coûts parfois incompatibles) accentue l'importance des deux thèmes.

Notre analyse industrielle est focalisée sur le pilotage des flux internationaux au travers des plateformes logistiques. Carbone & Martino (2003) analysent le nouveau rôle des ports maritimes, les activités et les acteurs associés, notamment les centres logistiques. En effet, beaucoup de constructeurs automobiles ont mis en place des plateformes logistiques d'exportation de pièces, afin de relier les usines lointaines avec des fournisseurs à proximité. Renault a créé, en 1975, une première plateforme dans la zone portuaire de Rouen, France (Baumgartner 1998). A ce jour, Renault a 11 plateformes logistiques de transit et d'exportation de pièces. PSA a ouvert en 2002, avec son partenaire GEFECO, un centre logistique au Havre, en France, pour envoyer des pièces aux usines outre-mer. A ce jour, 5 plateformes logistiques, appelées PLI (Plateforme Logistique Internationale), exportent des pièces aux usines PSA dans le monde (Guerrero & Ng 2015). Le centre de distribution Toyota à Ontario (USA) a été créé pour supporter la croissance de production en Amérique du Nord et également pour exporter des pièces au Japon, permettant à l'entreprise de consolider le transport et de réduire les temps de transit (Witt 1998). Le port de Honmoku au Japon, accueille, depuis 1967, une plateforme logistique de Nissan, qui traite 300 conteneurs et 1000 camions par jour<sup>5</sup>.

Outre un point de consolidation physique, les plateformes logistiques peuvent avoir un rôle majeur sur la gestion de l'approvisionnement, en étant un point intermédiaire des flux d'information. Ainsi, les clients (usines) envoient demandes de livraison auprès de la plateforme, qui va par la suite transmettre ses demandes de livraison auprès des fournisseurs (de pièces). En synthèse, ces plateformes agissent en tant que fournisseurs des usines et en tant que clients des fournisseurs de pièces.

L'Alliance Renault-Nissan dispose d'un réseau global de 23 plateformes logistiques, appelées AILN (Alliance International Logistics Network). Le Tableau 1 montre quelques statistiques de l'activité des AILN Renault en 2015 : la première colonne et la deuxième colonne présentent, respectivement, le nombre total de conteneurs et le nombre total de mètres cubes qui ont été traités dans chacune des plateformes. Le reste des colonnes indiquent nombre de mètres cubes par type d'activité : exportation (activité principale), distribution locale et importation.

---

<sup>5</sup> <http://www.nissan-global.com/EN/REPORTS/2011/07/110716.html>

Diverses contraintes sont associées à l'activité d'une plateforme logistique, entre autres : la fréquence d'expression des besoins de la part des usines et vers les fournisseurs, la gestion des différents modes de transport, les problématiques capacitaires des fournisseurs, le management des ressources internes (main d'œuvre, surfaces, stock), la gestion des démarches fiscales et douanières. Dans ce travail de recherche, nous nous intéressons à la planification des flux des AILN et leur réseau logistique associé, ainsi qu'à l'ordonnancement des opérations dans l'atelier de la plateforme. La planification des flux est déclenchée par l'intégration des demandes de livraison envoyées par les usines. Plusieurs inducteurs de coûts doivent être pris en compte, par exemple : coût du transport (en amont et en aval), main d'œuvre et stockage. Les activités principales à planifier concernent les arrivées des camions depuis les fournisseurs, le niveau de charge interne et des stocks dans la plateforme, ainsi que le chargement des conteneurs vers les clients.

Plateformes AILN	Approx. FEU*	Mètres cubes (m <sup>3</sup> )			
		TOTAL	Export	Distribution locale	Import
Bursa (Turquie)	6 397	447 795	266 205	144 362	37 228
Busan (Corée du sud)	2 091	146 338	136 720	9 618	
Cordoba (Argentine)	841	58 875	58 875		
Curitiba (Brésil)	2 118	148 264	148 264		
Grand-Couronne (France)	5 944	416 061	383 080		32 981
Moscou (Russie)	18	1 250	1 250		
Pitesti (Roumanie)	30 138	2 109 654	2 000 290		109 364
Pune/Chennai (Inde)	1 506	105 403	105 403		
Tanger (Maroc)	970	67 867	67 867		
Valladolid (Espagne)	3 287	230 114	167 675		62 439
<b>TOTAL</b>	<b>53 309</b>	<b>3 731 621</b>	<b>3 335 362</b>	<b>153 980</b>	<b>242 012</b>

\* Forty-foot equivalent unit (conteneur)

Tableau 1. *Activité des plateformes AILN Renault en 2015 (Renault, 2016)*

En complément à la planification des flux, un ordonnancement des opérations dans l'atelier de la plateforme s'avère essentiel. Il s'agit de problématiques comme l'affectation des portes de déchargement aux camions, la répartition détaillée des tâches entre les opérateurs (qui peuvent inclure des opérations de repackaging), l'affectation des colis aux conteneurs à expédier et les portes de départ à utiliser, entre autres. Ces sujets seront approfondis dans le chapitre suivant.

#### 1.4. Problématique de recherche et apports

Le contexte présenté dans les sections précédentes nous montre que la maîtrise des flux logistiques internationaux est aujourd'hui un sujet majeur dans l'industrie automobile. Les constructeurs automobiles, comme Renault et Nissan, ont mis en place des plateformes logistiques d'exportation de pièces. Elles jouent un double rôle : (1) point intermédiaire des flux d'information, entre les usines et les fournisseurs, pour faciliter l'approvisionnement des usines clients, et (2) point de consolidation physique, pour obtenir des économies de transport, avec des réceptions des camions en provenance des fournisseurs, des activités de repackaging dans l'atelier de la plateforme et des expéditions des conteneurs vers les usines clientes. Sur cette base, nos deux problématiques de recherche sont :

- Planification des flux dans le centre de crossdock et le réseau logistique associé, sur un horizon d'une semaine et une planification à la journée. Sur la base des demandes des usines clientes, il faut planifier le transport amont (entre le fournisseur et la plateforme), les activités internes (déchargement, traitement et chargement) et le transport aval (entre la plateforme et les clients).
- Ordonnancement des activités dans l'atelier du centre de crossdock, sur un horizon d'une journée et un ordonnancement au créneau horaire. Sur la base de la planification du réseau logistique, il faut ordonnancer les opérations internes et les flux de colis entre les différentes zones de l'atelier : déchargement, stockage temporaire, repackaging et chargement.

Les contraintes et les décisions spécifiques à chacune de ces problématiques rendent complexe une modélisation intégrée. Par conséquent, nous proposons des modèles indépendants pour chacune des deux problématiques, mais qui, utilisés de manière séquentielle, apportent une solution globale aux plateformes logistiques. Notre partenariat industriel avec Renault nous a permis de tester et de valider une partie de nos approches, grâce à des expérimentations avec des données réelles et à la validation avec des outils disponibles dans l'entreprise. Les résultats encourageants de ces expérimentations ont amené, dans un premier temps, à la mise en place de tests opérationnels dans deux AILN Renault et dans un deuxième temps, à la validation du développement d'un nouveau processus de planification dans les plateformes logistiques, sous forme d'un projet d'évolution du système informatique. Nous avons également travaillé avec Nissan, notamment en menant un benchmark sur la méthode de planification et le pilotage des activités dans ses AILN. Cette étude nous a permis d'identifier plusieurs meilleures pratiques, qui ont été prises en compte dans la conception de la solution proposée et nous considérons que notre approche peut être appliquée dans les AILN Nissan.

Le fonctionnement des plateformes logistiques dans l'industrie automobile peut être associé dans un premier temps à un entrepôt traditionnel, car elles représentent un point intermédiaire dans une chaîne logistique, en commandant et recevant des produits en provenance d'un

ensemble de fournisseurs, afin de répondre par la suite aux demandes d'un ensemble de clients. En revanche, nous avons expliqué que les plateformes logistiques dans l'industrie automobile n'ont pas une vocation de stockage de produits, mais plutôt à être un point de passage et de consolidation. Ces caractéristiques correspondent plutôt au mode de fonctionnement d'un centre de crossdocking, où les activités de stockage et de *picking* (préparation des commandes) sont supprimées. Ainsi, les produits sont transportés de la zone de déchargement à la zone de chargement, avec un minimum de stockage intermédiaire et d'opérations de traitement.

Malgré une vaste littérature sur les problématiques de planification et de pilotage des activités dans les centres crossdocking, la plupart de travaux traitent des problématiques isolées (Buijs et al. 2014). D'autre part, les exemples d'implémentation dans l'industrie des modèles et des approches proposés sont rares, ce qui génère un écart entre la recherche académique et les pratiques industrielles (Ladier & Alpan, 2016). Sur la base d'un cas industriel, cette thèse présente une approche de planification qui prend en compte l'ensemble d'inducteurs de coûts dans un réseau d'un centre de crossdock, qui inclut les particularités des plateformes logistiques dans l'industrie automobile, comme des activités de repackaging et la complexité du chargement des conteneurs, liée à la grande diversité de colis traités dans ces centres de crossdock.

## 2. Analyse du cas industriel

Chez Renault, au sein de la Direction de la Supply Chain Alliance, nous retrouvons le département d'Ingénierie des Flux Amont, responsable des approvisionnements à l'international, en particulier les flux de pièces passant par les plateformes logistiques AILN. Notre travail s'est déroulé dans l'équipe responsable de la définition des processus et du suivi de la performance des plateformes logistiques Renault. Pour cette raison, nos analyses seront focalisées davantage sur les AILN Renault. Les explications sur les AILN Nissan, qui correspondent en particulier au fonctionnement de l'AILN au Japon, seront moins approfondies, tout en gardant un apport important au développement des solutions proposées dans cette thèse.

Ce chapitre a comme objectif de décrire en détail le fonctionnement des AILN Renault et des AILN Nissan afin de bien définir le problème industriel que nous allons étudier. Tout d'abord, nous caractérisons les différentes AILN Renault, sur la base des statistiques sur leur activité. Puis, les principes de fonctionnement sont détaillés, remarquant les points en commun et les divergences entre Renault et Nissan. Ensuite, nous détaillons les approches de planification et d'ordonnancement des activités dans les AILN. Sur la base d'études de terrain, nous avons également évalué les impacts des approches « théoriques » sur la performance des AILN. Finalement, en prenant en compte tous ces éléments, nous aboutirons à une analyse détaillée du problème pour pouvoir par la suite proposer les solutions qui seront développées.

### 2.1. Fonctionnement et statistiques des AILN Renault

La Figure 5 représente le réseau logistique associé à une AILN. Elles sont responsables, dans un premier temps, de la gestion du flux d'information : intégration des demandes de livraison des usines clientes, consolidation des besoins et envoi des demandes de livraison auprès des fournisseurs. Deuxièmement, elles sont en charge des flux physiques : réception et déchargement des camions, traitement des colis, consolidation par client, chargement et expédition des conteneurs. Au préalable, une équipe est responsable chez Renault de décider du parcours logistique des pièces entre les fournisseurs et les usines. Ainsi, quand un nouveau besoin d'approvisionnement apparaît, une analyse économique est faite pour décider si l'on crée un parcours direct (fournisseurs avec suffisamment de volume pour faire des conteneurs complets) ou si les pièces vont transiter par une plateforme AILN. A ce stade, nous identifions deux spécificités des plateformes AILN Renault. La première est le fait qu'elles agissent en tant que fournisseur (vis-à-vis des usines clients) et en tant que client (vis-à-vis des fournisseurs de pièces). Cela se traduit par une gestion de l'approvisionnement propre à l'AILN. La deuxième est liée au changement de mode de transport entre l'amont (terrestre) et l'aval (maritime).

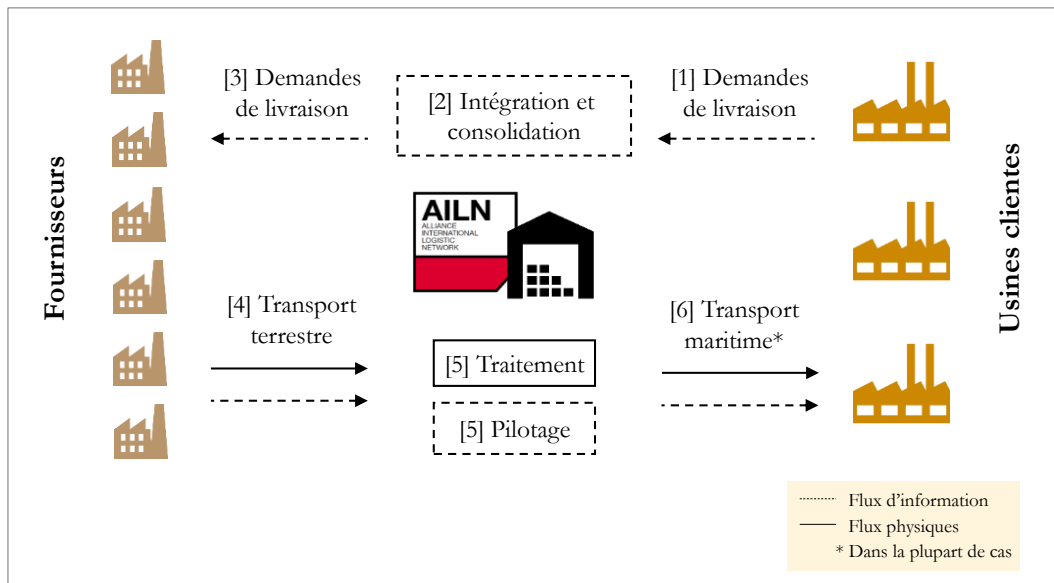


Figure 5. Réseau logistique associé à une plateforme logistique AILN

Le Tableau 2 présente les principaux chiffres pour chacune des plateformes AILN Renault. Sur la base de ces statistiques, voici quelques renseignements importants concernant les flux d'information :

- Nous constatons la différence entre le nombre de fournisseurs et le nombre de clients associés à une AILN, en particulier pour les plateformes logistiques situées en Europe. En termes de flux d'information, même si chaque client n'est pas concerné par la totalité des fournisseurs, il est clair que le fait d'avoir une entité intermédiaire entre lui et le fournisseur facilite la gestion des approvisionnements lointains. Les usines clientes communiquent uniquement avec l'AILN, qui est responsable de l'ensemble des approvisionnements.
- En termes de préavis de passage de commande, la majorité de fournisseurs ont un préavis d'une semaine (sauf deux AILN, où la plupart de fournisseurs sont à 2 semaines de préavis). Il s'agit du temps de production ou de préparation des pièces chez le fournisseur et du temps de transport vers l'AILN. D'autre part, la plupart des clients sont à plus de 5 semaines de préavis, ce qui explique les longs délais d'approvisionnement.



AILN	Amont		Interne				Aval	
	FRNS	Préavis semaines	Diversité composants	Diversité emballage	Activité nb colis	Activité m <sup>3</sup>	CLNS	Préavis semaines
Bursa	~200	1S : 60% 2S : 30% >2S : 10%	~5000	~200	D : 68% G : 30% C : 2%	81% 1% 18%	~10	5-10S : 67% 11-15S : 33%
Busan	~100	2S : 100%	~1000	~100	D : 48% G : 13% C : 39%	98% 1% 1%	~15	5-10S : 20% 11-15S : 80%
Cordoba	~50	1S : 100%	~300	~50	D : 49% G : 11% C : 40%	54% 1% 45%	~10	1-5S : 57% 5-10S : 29% 11-15S : 14%
Curitiba	~150	1S : 93% 2S : 1% >2S : 6%	~1000	~50	D : 90% G : 9% C : 1%	98% 1% 1%	~10	1-5S : 11% 5-10S : 56% 11-15S : 33%
Grand-Couronne	~550	1S : 97% 2S : 2% >2S : 1%	~4000	~250	D : 49% G : 44% C : 7%	90% 4% 6%	~20	1-5S : 5% 5-10S : 75% 11-15S : 20%
Moscou	<i>Démarrage récent, pas de données significatives</i>							
Pitesti	~550	1S : 18% 2S : 77% >2S : 5%	~6000	~200	D : 48% G : 48% C : 4%	78% 8% 14%	~15	5-10S : 63% 11-15S : 37%
Pune	~300	2S : 100%	~2000	~100	D : 71% G : 16% C : 13%	47% 1% 52%	~15	5-10S : 43% 11-15S : 57%
Tanger	~50	1S : 100%	~500	~50	D : 89% G : 2% C : 9%	47% 1% 52%	~10	5-10S : 100%
Valladolid	~250	1S : 67% 2S : 18% >2S : 15%	~1500	~100	D : 67% G : 21% C : 12%	58% 1% 41%	~20	5-10S : 67% 11-15S : 33%

FRNS : nombre de fournisseurs.  
 Activité D : Direct, G : groupement, C : conditionnement.  
 CLNS : nombre de clients.

Tableau 2. Caractérisation et statistiques des AILN Renault

En termes de flux physiques, les points importants sont :

- La consolidation des pièces dans l'AILN qui permet de faire des économies de transport très significatives, en particulier sur le transport aval, vu le grand nombre de fournisseurs impliqués.
- Une diversité assez importante en termes de composants et de types de colis (dimensions et matière), ceci complexifie les opérations internes, notamment le chargement des conteneurs, en raison des règles de *gerbabilité* (empilage) des colis.
- Il existe trois types d'activité dans l'atelier AILN : flux direct (D), où le colis est déplacé directement à la zone d'expédition ; flux de groupement (G), qui correspond à des colis de petite taille qui sont mis dans un emballage plus grand, flux de conditionnement (C), où quand l'emballage en provenance du fournisseur doit être transformé (ex. : pour l'adapter aux conditions du transport

maritime) ou changé pour un autre (ex. : l'emballage d'origine doit être retourné au fournisseur). Finalement, un flux mixte (C et G) peut également exister. Pour faire référence aux opérations (G), (C) et (C et G) nous utilisons le terme générique de *repackaging*. La Figure 6 illustre ces flux.

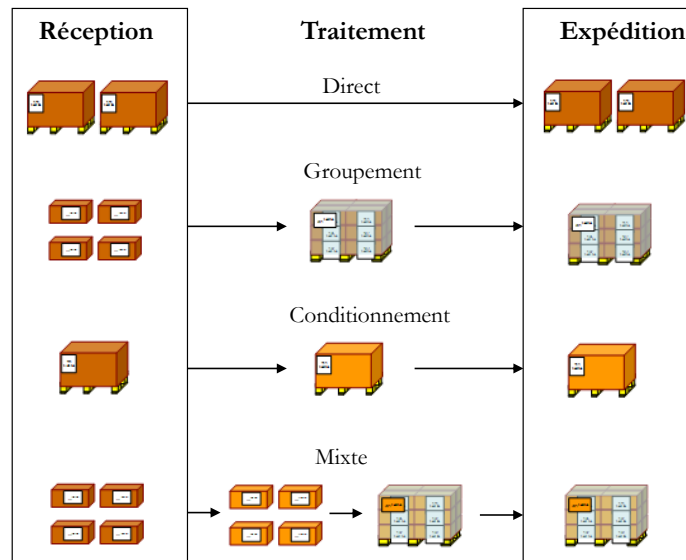


Figure 6. Flux physiques dans les AILN

## 2.2. Le calendrier de livraison ou Vanning Time Table

Chaque parcours entre une AILN et une usine cliente est décrit dans la *Vanning Time Table* (*VTT*). Il s'agit d'un calendrier qui regroupe toutes les étapes entre l'expression des besoins client et le moment où le client reçoit et consomme les pièces. Ainsi, les flux d'information et les flux physiques y sont représentés. La Figure 7 présente l'exemple d'une *VTT*.

Nous allons expliquer le parcours logistique entre les dates de fabrication de l'usine cliente et la date d'émission de la demande de livraison (DL) du client auprès de l'AILN. La deuxième ligne de la Figure 7 représente la date de consommation des pièces chez le client. Ces dates correspondent aux dates de réception demandées par le client, que nous appellerons *due dates*. Un premier décalage d'une semaine est appliqué. Il correspond au temps de déchargement des conteneurs et à la préparation des pièces dans l'usine. Environ cinq jours sont nécessaires pour transporter les conteneurs entre le port d'arrivée et l'usine. Deux jours de sécurité y sont rajoutés, vis-à-vis de la date estimée d'arrivée du bateau. Ensuite, nous retrouvons le temps de transit maritime, qui dans cet exemple est de deux semaines. Le *cut-off* du bateau (date limite de dépôt des conteneurs au port) est fixé au mercredi de la semaine 4. Ensuite, nous retrouvons les dates d'expédition des pièces depuis l'AILN vers le port de départ. Par défaut, une journée est accordée au traitement (stockage, repackaging, etc.) et à la mise en conteneur des pièces à l'AILN, à partir de la date de réception. À partir de ces dates de réception, les demandes de

livraison (DL) auprès des fournisseurs sont envoyées. Finalement, nous retrouvons la date d'envoi des DL de la part du client, auprès de l'AILN. C'est-à-dire, pour la fabrication prévue en semaine 9, l'usine doit transmettre ses demandes de pièces à l'AILN en semaine 1.

Notre travail de recherche est focalisé sur les activités qui ont lieu entre la date du départ du bateau et la date d'émission de la DL client (la partie gauche du schéma de la *VTT*). A ce stade, nous soulignons une hypothèse importante : il y a un seul bateau par semaine (transport aval de l'AILN) et toute la demande client de la semaine doit être livrée dans ce transport. Chez Nissan, le concept de *VTT* est très similaire à celui que nous venons de présenter pour les AILN Renault.

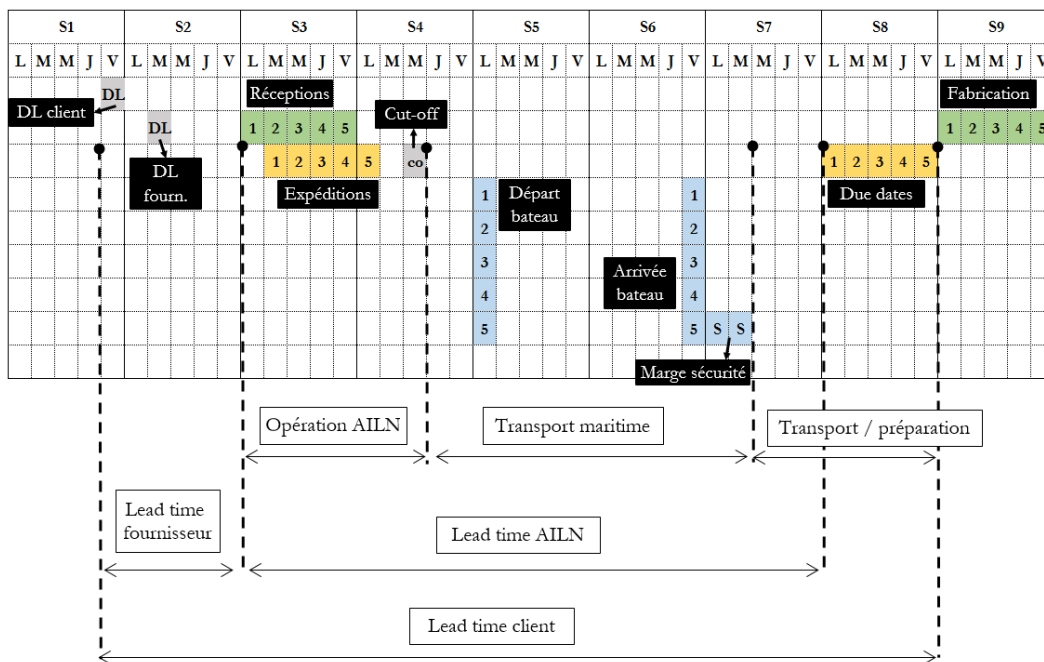


Figure 7. Exemple d'une Vanning Time Table d'une AILN Renault

Les deux sections suivantes détaillent le processus de planification du réseau logistique d'une AILN et le processus de pilotage des opérations dans l'atelier AILN, respectivement, en expliquant les différences entre les approches Renault et Nissan.

### 2.3. Planification des flux du réseau logistique AILN

La partie gauche du schéma de la *VTT* (entre l'émission de la DL client et le départ du bateau) représente globalement le processus de planification des flux du réseau logistique de l'AILN. Ce processus est fait une fois par semaine, avec une planification pour les différents jours de la semaine. Sur la base des commandes client, les programmes d'expédition, de traitement de colis (stockage, repackaging, etc.) et de réception sont définis.

A ce stade, nous identifions les décisions ou les contraintes suivantes associées à chaque segment du réseau logistique :

- Amont : tournées de véhicules (décision ou contrainte), allocation de produits aux camions disponibles (décision), fenêtres de temps (contrainte).
- Interne : niveau de stockage (décision ou contrainte), niveau de charge (décision ou contrainte).
- Aval : allocation de produits aux conteneurs disponibles (décision), fenêtres de temps (contrainte), demandes client (contrainte).

Sur cette base, nous expliquons par la suite les méthodes de planification chez Renault et chez Nissan.

### 2.3.1. AILN Renault

Nous commençons par la description de la problématique des tournées de véhicules. Chez Renault, les tournées sont définies dans une étape précédente à la planification hebdomadaire. Les parcours de transport et leurs caractéristiques sont figés pour des durées plus longues (un ou plusieurs mois pour le transport amont, un semestre ou l'année pour le transport aval) :

- En amont, sur la base des volumes prévisionnels et de la localisation géographique des fournisseurs, les organisateurs du transport définissent les parcours, appelés *circuits*. Un circuit est caractérisé par trois informations : le type de parcours, le(s) fournisseur(s) affectés et le nombre de camions disponibles par jour. Lors de cette définition, l'organisateur transport doit essayer de lisser le nombre de camions programmés par tranche horaire, pour éviter des engorgements. Il existe trois types de parcours : si le fournisseur a suffisamment de volume pour remplir au moins un camion par semaine, un *circuit direct* est défini ; si le fournisseur a l'équivalent de moins d'un camion par semaine, l'organisateur met en place un *circuit de collecte*, avec d'autres fournisseurs ; finalement, si la volumétrie du fournisseur est trop faible, un *circuit de ramassage* est privilégié, en passant par une plateforme de groupage entre le fournisseur et l'AILN. Dans ce dernier cas, la partie de ramassage, en amont de cette plateforme de groupage est en dehors de notre périmètre d'étude, car ce transport n'est pas sous la responsabilité de Renault.
- En aval, il n'y a pas une vraie problématique de tournées de véhicules, car tous les conteneurs sont expédiés au port de départ. Des liaisons journalières entre l'AILN et le(s) port(s) sont disponibles dans la plupart des cas. Le choix des compagnies et des routes maritimes est fait deux fois par an. Un bateau par semaine est affecté à chaque flux AILN-usine cliente. Il y a toutefois quelques exceptions, par exemple, l'AILN de Roumanie qui envoie des camions (au lieu de conteneurs maritimes) à l'un de ses clients.

Sur cette base, nous présentons dans le Tableau 3 un exemple précis du processus de planification dans les AILN Renault. En semaine 0 l'AILN reçoit les demandes de livraison de deux clients. Le client 1 exprime ses besoins pour la semaine 9 et le client 2 pour la semaine 8, avec des quantités journalières. Les décalages des transports entre l'AILN et les usines sont appliqués et nous retrouvons les programmes d'expédition. Les *due dates* client sont transposées et décalées d'une journée (du mardi au lundi, au lieu du lundi au vendredi). Comme expliqué avant, une journée de stockage dans la plateforme est affectée par défaut. Ce décalage permet de générer le programme de traitement (stockage, repackaging, etc.). S'agissant d'un composant unique, un processus de consolidation au niveau du fournisseur est fait. Pour le programme de réception, le calendrier de livraison pour le transport amont est pris en compte. Dans l'exemple, le circuit de transport livre à l'AILN le lundi, le mercredi et le vendredi. Finalement, l'AILN transmet la demande de livraison associée le lundi de S1.

Activité	S0	S1					S2					S3					S7					S8					S9									
	V	L	M	M	J	V	L	M	M	J	V	L	M	M	J	V	L	M	M	J	V	L	M	M	J	V	L	M	M	J	V					
Réception DL-C C1 et C2	X																																			
Due date C1																																				
Due date C2																																				
Arrivée bateau C1																																				
Arrivée bateau C2																																				
Départ bateau C1												c/o											85													
Départ bateau C2												c/o											90													
Expédition C1												20	35	20	10	0																				
Expédition C2												10	0	20	20	40																				
Traitement C1												20	35	20	10	0																				
Traitement C2												10	0	20	20	40																				
Réception												65	0	70	0	40																				
Envoie DL-F	X																																			

DL-C : demande de livraison client  
 DL-F : demande de livraison fournisseur  
 c/o : cut-off du bateau

Tableau 3. Planification des flux dans les AILN Renault. Exemple pour un composant demandé par deux clients différents

Ainsi, nous constatons que la planification des flux dans les AILN Renault est totalement orientée vers le respect des *due dates* client, et qu'elle ne s'appuie pas sur aucun élément de coût des différents segments du réseau logistique. En amont, la prise en compte des informations des circuits se limite au respect des calendriers de livraison, mais il n'y a pas un processus d'estimation du nombre de camions à utiliser. En interne de la plateforme, la méthode actuelle risque de générer des pics de charge, notamment sur les opérations de repackaging, mais aussi sur le déchargement des camions et le chargement des conteneurs. Même si un colis ne doit pas passer plus de 24 heures dans l'AILN, le niveau de stocks risque de dépasser la capacité de

l'atelier. Enfin, en aval, aucun processus d'estimation du nombre de conteneurs à utiliser n'est fait pour générer le programme d'expédition. Sur la base de cette description, la Figure 8 représente la planification des flux, avec l'approche Renault.

En conclusion, la méthode de planification d'une AILN Renault suit les principes du Juste-à-Temps, en optimisant ainsi la surface de stockage chez le client. Cette approche minimise également le temps passé par les colis dans la plateforme AILN et par conséquent la surface à utiliser. En revanche, d'autres coûts logistiques (transport amont, transport aval, ressources internes) ne sont pas pris en compte.

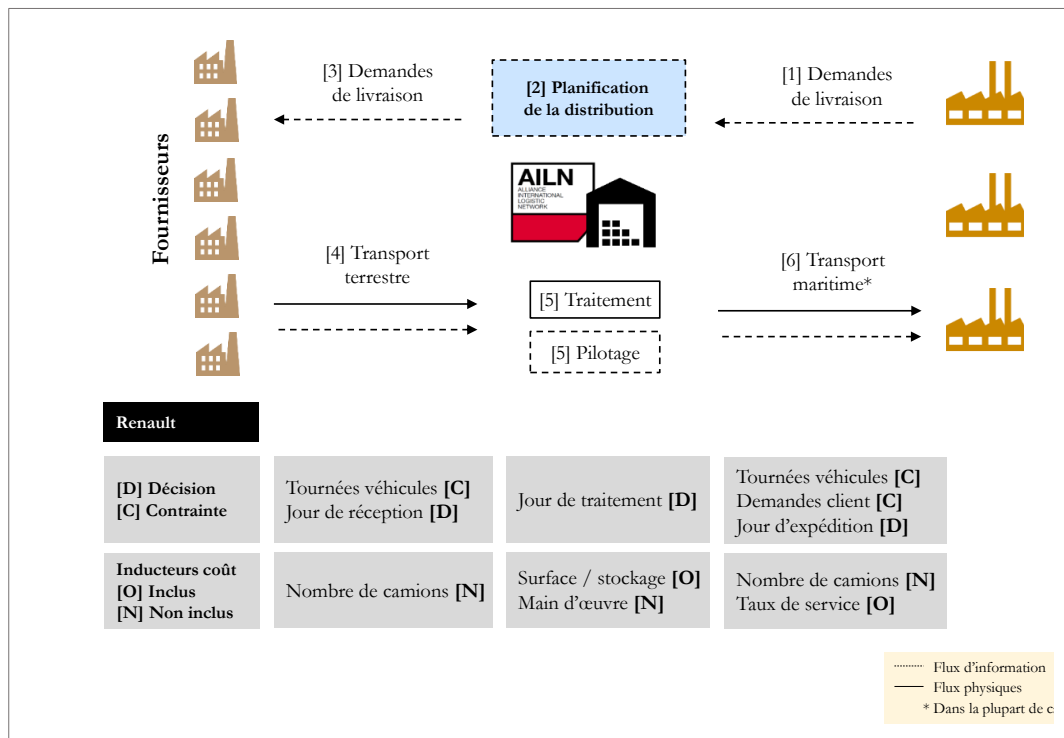


Figure 8. Planification des flux du réseau logistique AILN, avec la méthode Renault

### 2.3.2. AILN Nissan

Comme chez Renault, Nissan définit les tournées de véhicules à l'avance et ces décisions ne font pas partie de la planification hebdomadaire. Néanmoins, voici deux précisions : (1) en amont les parcours sont organisés dans leur grande majorité comme des circuits de collecte ; (2) en aval il peut y avoir plus d'un bateau par semaine, pour un flux donné AILN-usine cliente.

Nous allons suivre ce processus sur la base de l'exemple présenté dans le Tableau 4. Le client envoie sa demande de livraison en semaine 0 pour des *due dates* en semaine 10. Deux bateaux par semaine sont prévus pour ce flux et nous retrouvons deux décalages liés au transport maritime. Ensuite, une analyse de la demande client est effectuée par l'AILN, afin de générer les programmes d'expédition, de traitement et de réception.

Les étapes de ce processus sont :

1. Communication avec le fournisseur pour savoir s’il sera capable de livrer la quantité demandée par le client. Si sa réponse est négative, une négociation avec le client s’avère nécessaire et sa demande de livraison doit être adaptée. Cette première étape permet d’assurer, presque à 100%, les livraisons des fournisseurs. Cette étape est absente du processus de planification des AILN Renault ; les demandes de livraisons des clients ne sont pas remises en cause et il n’y a pas d’anticipation des éventuels problèmes d’approvisionnement auprès des fournisseurs. A ce sujet, une analyse d’impacts sur la performance est présentée dans la Section 2.5.
2. Estimation du nombre de conteneurs à utiliser et création des plans de chargement associés. Ce processus est fait à l’aide d’un outil de simulation qui inclut, entre autres, des contraintes sur la *gerbabilité* (empilement) des emballages et qui offre un module de visualisation 3D. Ensuite, chaque conteneur est affecté à une tranche horaire d’une journée précise. Ce processus d’affectation prend en compte des contraintes de charge d’activité dans l’atelier de l’AILN, notamment sur les activités de repackaging et de chargement. Le résultat de cette étape définit les programmes d’expédition et de traitement. Chez Renault, un outil de simulation similaire a été développé et est actuellement en phase de test. Cet outil n’a pas été intégré au processus de planification standard. Ce sujet est abordé dans la Partie IV de la thèse.
3. Finalement, le programme de réception est généré à partir des résultats de l’étape précédente. Un colis doit d’arriver à l’AILN pendant les deux tranches horaires qui précèdent le chargement du conteneur qui lui a été affecté.

Activité	S0	S1					S2					S3					S4					S9					S10																								
	V	L	M	M	J	V	L	M	M	J	V	L	M	M	J	V	L	M	M	J	V	L	M	M	J	V	L	M	M	J	V																				
Réception DL-C C1	X																																																		
Due date																																																			
Arrivée bateau 2																																																			
Arrivée bateau 1																																																			
Départ bateau 2																																																			
Départ bateau 1																																																			
Analyse DL-C																																																			
Expédition																																																			
Traitement																																																			
Réception																																																			
Analyse DL-C																																																			
Envoi DL-F						X																																													

DL-C : demande de livraison client  
 DL-F : demande de livraison fournisseur  
 c/o : *cut-off* du bateau

Tableau 4. Planification des flux dans les AILN Nissan. Exemple pour un composant demandé par un client

Ainsi, les 75 pièces correspondantes au bateau 1, sont réparties entre les trois premiers jours de la semaine et chaque colis est affecté à un conteneur précis, dans une des tranches horaires de la journée. De même pour les 10 pièces restantes. Sur la base du programme de réception, les demandes de livraison sont envoyées au fournisseur. Entre 3 à 5 jours s'écoulent entre la réception des demandes clients et la transmission des demandes aux fournisseurs. Pendant ce temps, l'AILN effectue les trois étapes du processus d'analyse de la DL client, décrites précédemment.

En résumé, l'approche de planification Nissan suit le principe du Juste-à-Temps non seulement vis-à-vis du client, mais aussi vis-à-vis de l'activité AILN, en programmant ses opérations à la tranche horaire. Le respect de cette planification devrait être garanti, en grande partie, grâce à la négociation avec les clients et les fournisseurs sur les quantités à livrer. Les coûts du transport aval sont inclus dans cette planification, avec la génération des plans de chargement qui doivent assurer une maximisation du remplissage. En revanche, l'organisation du transport amont est définie par les opérations internes et aucune contrainte n'est prise en compte au moment de la planification. Ceci pourrait générer des coûts logistiques supplémentaires, avec des camions très peu remplis. La Figure 9 synthétise l'approche de planification Nissan. Les impacts de cette méthode sur la performance réelle de ses AILN seront présentés dans la suite de ce chapitre, à partir des résultats d'une étude de terrain.

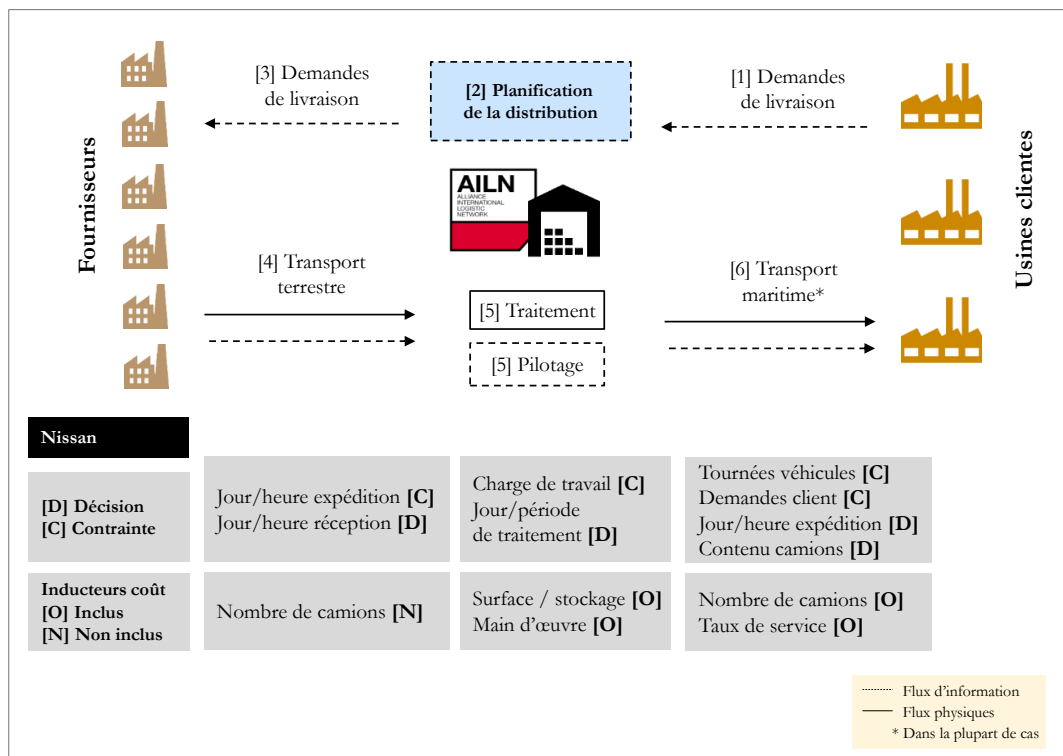


Figure 9. Planification des flux du réseau logistique AILN, avec la méthode Nissan



## 2.4. Ordonnancement et pilotage des activités dans l'atelier AILN

Nous allons décrire l'ordonnancement des opérations de déchargement des camions, de déplacement de colis, de repackaging et du chargement des conteneurs. Nous nous intéressons également au pilotage des flux physiques associés.

### 2.4.1. AILN Renault

L'ordonnancement des opérations dans les AILN Renault est défini par le processus de planification que nous avons expliqué dans la section précédente. Les programmes de réception, de traitement et d'expédition, exprimés à la journée, définissent les flux physiques à l'intérieur de l'atelier. Ainsi, la maille d'ordonnancement est la journée. La Figure 10 présente l'agencement générique de l'atelier des AILN Renault. Sur cette base, nous allons expliquer le pilotage des flux physiques dans les AILN Renault.

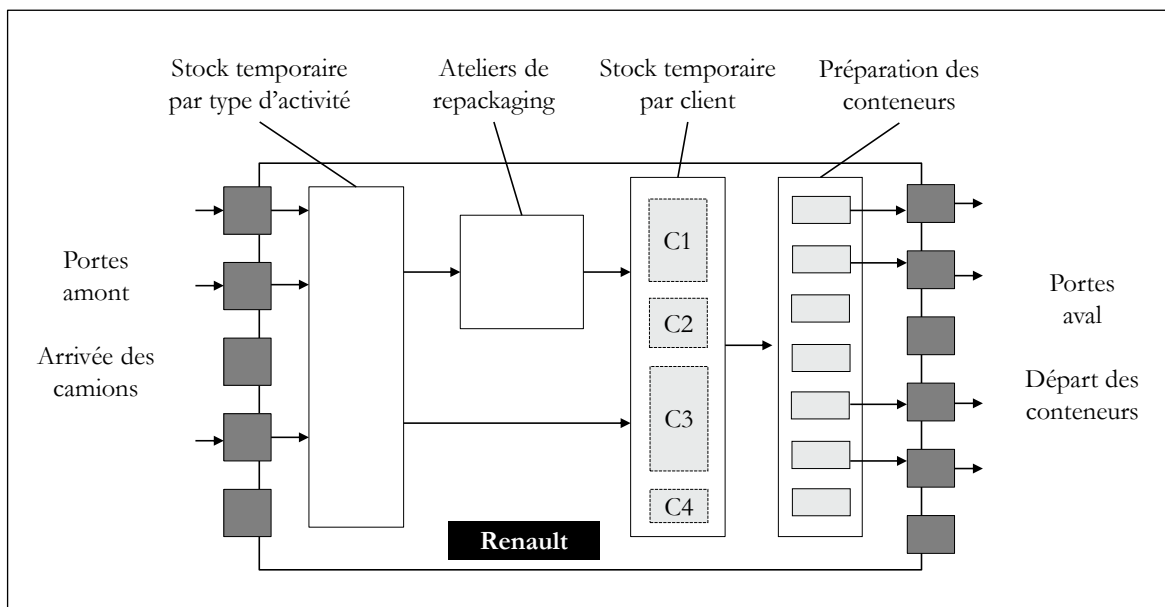


Figure 10. Agencement de l'atelier dans les AILN Renault

Quand un camion arrive, il se présente à la réception administrative pour une vérification de la documentation. Ensuite, une porte de déchargement lui est affectée. Une fois au quai, le camion est déchargé et les colis sont disposés dans une zone de stockage temporaire, triés par type d'activité. Ensuite, chaque colis est affecté à un client final et afin de guider les flux physiques, un ré-étiquetage est fait pour tous les colis. Cette étiquette contient notamment l'information du client final et la date du programme d'expédition, ainsi que le type d'activité. Cette dernière information indique aux opérateurs vers quelle zone de l'atelier il faut transporter les colis. Les colis en flux direct sont amenés dans la zone de stock temporaire, où ils sont triés par client. Dans l'atelier de groupement, les colis de petites dimensions d'un même client sont emballés dans un colis plus grand, en respectant des règles de poids et de *gerbabilité* (empilement)

et le choix du contenu et du contenant est fait par les opérateurs. Dans les ateliers de conditionnement, les opérateurs doivent déballer toutes les pièces et les réaffecter à un nouvel emballage (exemple : des moteurs qui arrivent en emballages métalliques et qui sont mis dans des emballages en bois). Les colis sortant des ateliers de repackaging sont mis dans la zone de stockage temporaire du client correspondant.

La préparation des conteneurs est faite à partir des colis disponibles dans la zone temporaire et des dates d'expédition calculées pendant la phase de planification. Les colis sont déplacés dans des trames au sol, représentant un conteneur (elles sont plus longues, pour pouvoir passer entre les piles et faire des contrôles). A chaque fois qu'un emballage est posé dans cette zone, il est scanné. Ceci permet à l'opérateur de suivre le taux de remplissage (en m<sup>3</sup> et kilogrammes) du conteneur en cours de préparation. Quand l'opérateur considère qu'il a atteint un « bon » taux de remplissage (sur la base historique du client concerné) il « ferme » la zone de préparation. Ensuite, une porte de sortie lui est affectée et les colis sont chargés dans un conteneur. Le conteneur est transporté vers une zone de stockage des conteneurs pleins, pour attendre le transport vers le port maritime.

En résumé, chez Renault, les problématiques d'ordonnancement sont traitées ainsi :

- La maille temporaire est la journée : les programmes de traitement et de réception, calculés dans la phase de planification, définissent les opérations de déchargement et de repackaging.
- L'affectation du client final est réalisée après la réception de pièces et les flux physiques sont guidés par une étiquette posée dans l'AILN sur chaque colis.
- Suite à la réception, les opérations se font « au fil de l'eau », sur la base des colis disponibles et la date d'expédition théorique. Il n'y a pas un ordonnancement à la tranche horaire.
- Pour l'activité de chargement de conteneurs, la date du programme d'expédition n'est pas toujours respectée, car les opérateurs privilégient le remplissage des conteneurs, au détriment de la date d'expédition. La contrainte sur le départ des colis appliquée dans l'AILN est à la semaine et non pas à la journée.
- La performance sur le taux de remplissage des conteneurs repose sur les compétences et l'expérience des opérateurs.
- Le temps de stockage d'un colis reste théoriquement d'une journée, mais que cela dépend des choix effectués par les opérateurs.

#### 2.4.2. AILN Nissan

Comme chez Renault, l'ordonnancement des opérations dans les AILN Nissan est fait dès la planification des flux. Nous rappelons que les programmes de réception, de traitement et d'expédition sont exprimés à la maille des plages de temps de deux heures. Ainsi, les opérations

et les flux physiques dans l'atelier sont définis. La Figure 11 présente la configuration d'un atelier AILN Nissan. La principale différence avec Renault réside dans la zone de stock temporaire : un tri par identifiant de conteneur est fait plutôt que par client final. La surface nécessaire pour ce stockage est plus petite que celle utilisée chez Renault, car elle est théoriquement vidée toutes les deux heures. Nous allons expliquer par la suite, le pilotage des flux physiques dans les AILN Nissan.

Les camions se présentent dans la zone de réception où un quai de déchargement disponible leur est affecté. Comme chez Renault, les colis sont déchargés dans une zone temporaire, triés par type d'activité. Aucun ré-étiquetage n'est nécessaire, car toutes les informations concernant la destination finale des pièces sont transmises au fournisseur, qui imprime l'étiquette finale. De plus, ces étiquettes contiennent des données nécessaires au pilotage de l'opération de chargement des conteneurs, à savoir : la tranche horaire, le numéro du conteneur et la position du colis dans le conteneur. Les colis en flux direct, sont transportés dans la zone de stockage temporaire, avant la préparation des conteneurs. Les colis qui nécessitent du repackaging sont transportés de la zone de déchargement aux ateliers respectifs. Suite au repackaging, les colis sont amenés à la zone. Une fois que tous les colis d'un conteneur sont disponibles dans le stock temporaire, on les amène à une des zones de préparation, pour recréer le plan de chargement, sur la base des informations dans les étiquettes. Quand cette opération est terminée, les colis sont chargés dans le conteneur, qui seront par la suite transportés en camion jusqu'au port.

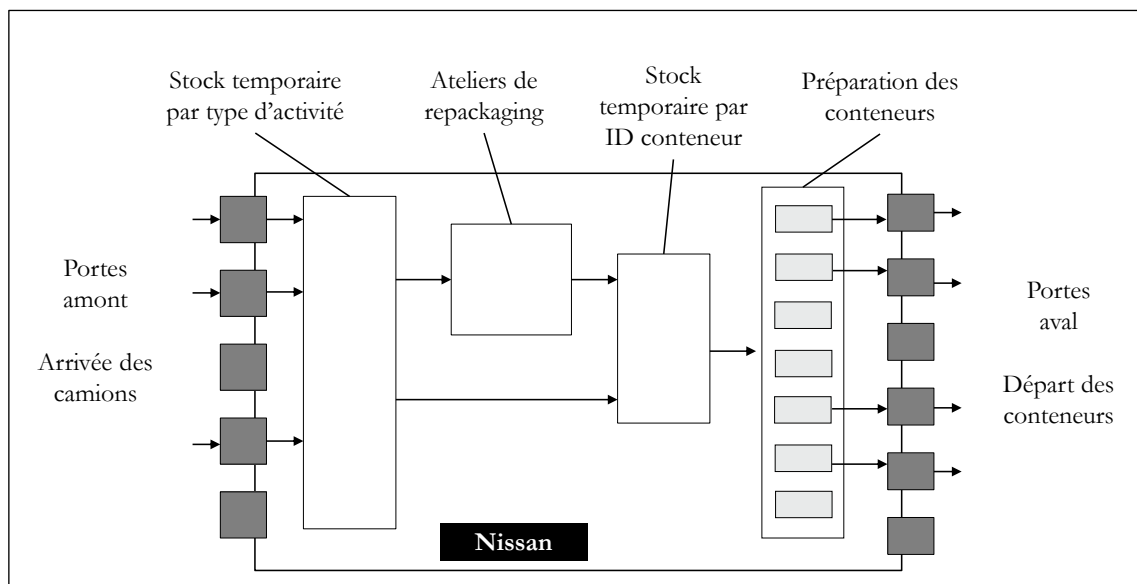


Figure 11. Agencement de l'atelier dans les AILN Nissan

En synthèse, l'ordonnancement des opérations chez Nissan est caractérisé ainsi :

- La maille temporaire correspond à des plages de deux heures : les programmes d'expédition, de traitement et de réception, générés pendant la planification des

flux, définissent les opérations dans l'atelier, à savoir : déchargement des camions, repackaging des colis et chargement des conteneurs.

- Pour chaque colis, le client final est affecté dès le processus de planification et la demande de livraison envoyée aux fournisseurs en contient les informations spécifiques.
- Suite à la réception, les opérations se font en respectant l'ordonnancement défini lors du processus de planification.
- La performance sur le taux de remplissage des conteneurs repose sur le système informatique, sous forme d'outil de simulation de chargement.
- Le temps d'écoulement des colis est restreint théoriquement à 4 heures. Ainsi, le stockage dans la zone d'attente est minimisé.

## 2.5. Impacts des approches de planification et d'ordonnancement dans l'AILN

Suite à l'explication des approches de planification et d'ordonnancement, nous nous intéressons aux impacts sur l'activité sur le terrain et à la performance des AILN.

### 2.5.1. AILN Renault : analyse théorique

Cette section présente les résultats d'une étude réalisée dans l'AILN Renault en France. D'abord, la Figure 12 présente la distribution du programme d'expédition pour chacune des semaines analysées. Nous avons étudié la fluctuation entre les jours d'une même semaine et non pas la variabilité d'une semaine à l'autre. Le « pic » de la semaine est indiqué en bleu. La couleur jaune représente le jour avec la plus faible volumétrie. En moyenne, la différence entre ces deux valeurs est de 15 points. En considérant 20% comme l'idéal du volume à traiter par jour, 15 points d'écart est une valeur assez conséquente qui nous permet de corroborer que l'organisation et le niveau de charge interne (en termes de main d'œuvre directe et utilisation des surfaces) sont loin d'être optimaux. En particulier, ce non-lissage de charge impacte le dimensionnement hebdomadaire de la main d'œuvre directe : le nombre total d'opérateurs à engager est décidé en se basant sur la volumétrie à traiter, en particulier la journée représentant le pic de charge de la semaine.

L'absence d'un processus d'estimation du nombre de conteneurs (et des plans de chargement) pendant la phase de planification se traduit par un programme d'expédition non optimisé en termes de taux de remplissage des conteneurs. Les données présentées dans le Tableau 5 permettent d'illustrer cette situation sur quelques exemples. Pour chaque jour, nous présentons la volumétrie (en m<sup>3</sup>) et le nombre de conteneurs équivalents. Le total de la semaine est également présenté et nous constatons la différence entre le nombre de conteneurs en faisant la somme par jour et le nombre de conteneurs équivalents au volume total de la semaine. Au total, pour respecter le programme d'expédition journalier, l'AILN devra utiliser 99 conteneurs dans la semaine, 7 de plus que la valeur calculée sur la base du volume total de la semaine.

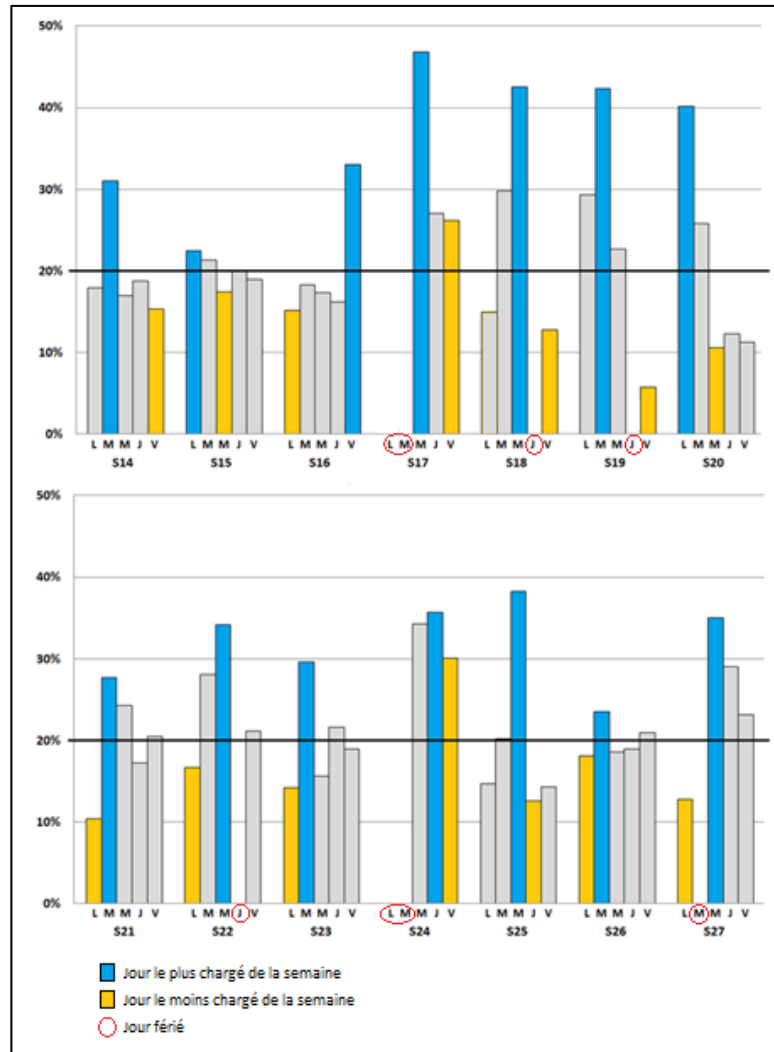


Figure 12. Distribution du programme d'expédition pour une des AILN Renault (volume affecté à chaque jour, par rapport au volume total de la semaine)

Client	Lundi		Mardi		Mercredi		Jeudi		Vendredi		Total		
	m3	Cont. équiv.	m3	Cont. équiv.	m3	Cont. équiv.	m3	Cont. équiv.	m3	Cont. équiv.	m3 total	Cont. équiv. (jours)	Cont. équiv. (semaine)
Usine 1	1002	14			2874	39			837	12	4713	65	63
Usine 2	119	2	59	1	478	7			104	2	760	12	11
Usine 3	56	1	34	1	22	1	18	1	16	1	146	5	2
Usine 4	117	2	344	5	263	4	224	3	196	3	1144	17	16
											<b>99</b>		<b>92</b>

Cont. équiv. : nombre de conteneurs équivalents. Colonne m3 divisé par 75, arrondi à l'entier supérieur

Cont. équiv. (jours) : somme de cont. équiv. de tous les jours.

Tableau 5. Programme d'expédition pour 4 clients différents. Volumétrie (m<sup>3</sup>) par jour

Nous analysons maintenant le programme de réception. La Figure 13 montre sa distribution pour les 14 semaines étudiées. Sur le même principe que le programme d'expédition, la différence moyenne entre le maximum et le minimum est calculée. Sa valeur est de 16 points. Nous retrouvons les mêmes impacts que ceux expliqués précédemment dans l'analyse du programme d'expédition.

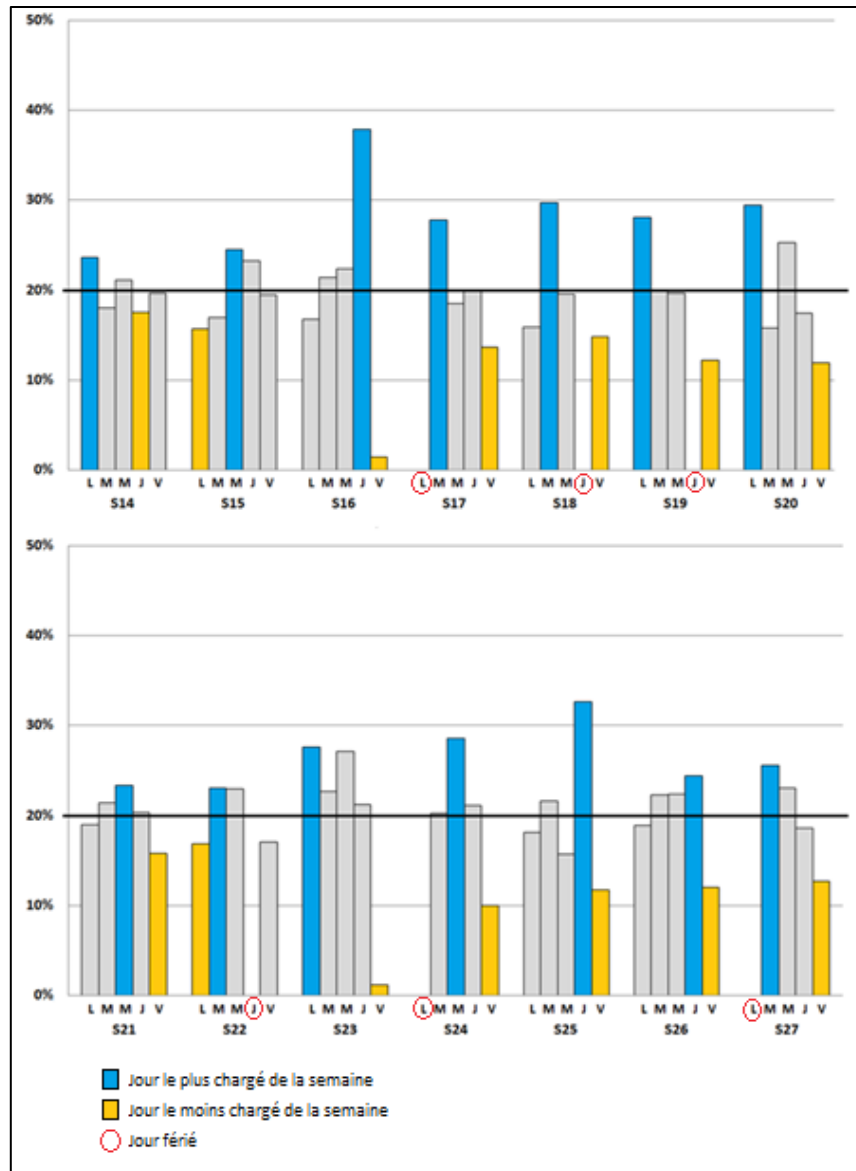


Figure 13. Distribution du programme de réception pour une des AILN Renault (volume affecté à chaque jour, par rapport au volume total de la semaine)

Concernant les taux de remplissage des camions, nous rappelons que le processus de planification prend en compte le calendrier de livraison (jour(s) dans le(s)quel(s) une pièce peut être livrée). Néanmoins, comme pour le programme d'expédition, il n'y a aucun processus d'estimation du nombre de camions (et des plans de chargement). A l'instar de l'analyse

présentée dans le Tableau 5, le Tableau 6 montre le programme de réception d'une semaine donnée, pour sept circuits de transport. L'impact sur le taux de remplissage est plus important que dans le programme d'expédition, car les volumes sont moins importants, du fait qu'il y a beaucoup plus de circuits en amont de l'ALN que de clients en aval. Au total, pour respecter le programme de réception journalier, l'AILN devra mettre en place 24 camions dans la semaine, 10 de plus que la valeur calculée sur la base du volume total de la semaine.

Client	Lundi		Mardi		Mercredi		Jeudi		Vendredi		Total		
	m3	Cam. équiv.	m3	Cam. équiv.	m3	Cam. équiv.	m3	Cam. équiv.	m3	Cam. équiv.	m3 total	Cam. équiv. (jours)	Cam. équiv. (semaine)
Circuit 1	96	2			4	1			67	1	167	4	2
Circuit 2	1	1	3	1	99	2	12	1	43	1	158	6	2
Circuit 3	36	1	34	1	80	1			39	1	189	4	3
Circuit 4	56	1	45	1	30	1	11				142	3	2
Circuit 5	12	1	29	1					39	1	80	3	1
Circuit 6					6	1			45	1	51	2	1
Circuit 7			111	2			69				180	2	3
												<b>24</b>	<b>14</b>

Cam. équiv. : nombre de conteneurs équivalents. Colonne m3 divisé par 88, arrondi à l'entier supérieur

Cam. équiv. (jours) : somme de cont. équiv. de tous les jours.

Cam. équiv. (semaine) : colonne m3 total divisé par 88, arrondi à l'entier supérieur

Tableau 6. Programme de réception pour 7 circuits de transport

### 2.5.2. AILN Renault : réalité sur le terrain

Suite à cette analyse des impacts théoriques de l'approche de planification, nous nous intéressons aux inducteurs de coûts et aux indicateurs de performance associés. Par rapport au coût total, le transport amont représente 25%, la main d'œuvre directe 7% et le transport aval 23%. Le 45% restant correspondent à d'autres coûts comme la main d'œuvre indirecte et les matériaux utilisés dans les opérations de repackaging (groupement et conditionnement). Le Tableau 7 présente le taux de remplissage des moyens de transport et les *taux de service* associés, pour la période analysée. Le *taux de service journalier* représente le respect des livraisons à la date demandée dans le programme de réception et le *taux de service hebdomadaire* mesure le respect des livraisons dans la semaine correspondant à la date du programme de réception (livraison au plus tard vendredi). En amont, l'impact du programme de réception est constaté, avec un taux de remplissage des camions de 52%. En termes de taux de service fournisseur, le taux de service journalier est de 70%, mais à la fin de la semaine, 92% des pièces ont été livrées.

En aval, malgré un programme d'expédition non optimal par rapport au remplissage des conteneurs, ce taux est relativement bon. Le taux de service journalier de 45% correspond au respect de la date proposée par le programme d'expédition. En effet, nous avons constaté que l'AILN se permet une flexibilité par rapport à la date d'expédition planifiée, pour assurer un taux de remplissage des conteneurs élevé. La date limite que s'impose l'AILN correspond à la fin de la semaine (car un seul transport maritime par semaine), ce qui assure les livraisons hebdomadaires chez les clients (taux de service hebdomadaire de 93%). Le fait de ne pas respecter la date calculée dans le programme d'expédition peut avoir un impact pour les clients, mais il est considéré faible par rapport au coût de non remplissage des conteneurs. Ceci s'explique en partie par le fait que les commandes envoyées par les clients sont calculées sur une base d'une prévision de la production à un horizon très distant (pour rappel, revoir le Tableau 2), qui n'est pas totalement fiable. L'intérêt de recevoir les pièces dans un ordre précis dans les conteneurs est beaucoup moins fort que celui d'optimiser leur remplissage.

	Amont	Aval
<b>Taux de remplissage</b>	52%	88%
<b>Taux de service journalier</b>	70%	45%
<b>Taux de service hebdomadaire</b>	92%	93%

Tableau 7. Indicateurs de performance, transport amont et aval, AILN Renault France

Comme nous pouvons le constater, malgré une planification à la journée, toutes les opérations physiques sont tirées par l'opération de chargement des conteneurs, avec la fin de la semaine comme contrainte de départ, plutôt que la date calculée dans le programme d'expédition. Un autre impact de cette organisation est le temps passé par les colis dans l'AILN. Nous rappelons que théoriquement le temps de transit est d'une journée, mais nous constatons qu'en réalité ce temps est en moyenne de 3 jours. Cette capacité de stockage permet d'atténuer la variabilité de la charge générée dans la planification théorique.

### 2.5.3. AILN Nissan : analyse théorique et réalité sur le terrain

Nous n'avons pas mené une étude chez Nissan aussi poussée que celle exposée dans les sections précédentes pour Renault, car notre travail est focalisé sur le constructeur Français. Néanmoins, suite à une visite au Japon et au travail de benchmark avec nos collègues de Nissan, nous avons recueilli un certain nombre d'éléments intéressants.



Concernant le processus de planification (expliqué dans la Section 2.3.2), voici les principales remarques :

- Le processus de vérification des livraisons fournisseurs s'avère très important. D'abord pour les fournisseurs, car cela facilite la communication avec son client (l'AILN). Pour l'AILN, cela permet d'assurer au maximum le respect des plans de chargement des conteneurs qui seront créés par la suite. Et pour les clients, car cela leur permet d'anticiper d'éventuels problèmes de livraison et de construire des plans d'action pour y répondre.
- Suite à une première proposition faite par l'outil de simulation, les plans de chargement de conteneurs sont corrigés manuellement afin d'augmenter le taux de remplissage.

En ce qui concerne l'ordonnancement et les flux physiques (présentés dans la Section 2.4.2), nous avons remarqué :

- Pour l'opération de préparation et de chargement de conteneurs, les opérateurs ont un peu de flexibilité. Le positionnement précis dans le conteneur n'est pas forcément respecté pour tous les emballages et pour aller plus vite, l'opérateur peut se permettre de prendre de décisions au niveau de l'empilage, mais toujours respectant l'identifiant conteneur.
- La gestion des aléas, même s'ils sont rares (l'AILN Nissan au Japon affiche un taux de service fournisseur de 99%), ont un fort impact dans l'activité de l'AILN. Par exemple, un retard fournisseur impacte tout l'ordonnancement et peut générer un conteneur incomplet. Une équipe est responsable de traiter cette problématique et peut remplacer cette pièce par une autre. Mais l'effet cascade n'est pas négligeable. Une fois la modification faite dans le système, le colis remplaçant doit être ré-étiqueté, afin d'inclure l'identifiant conteneur.

Les indicateurs de performance sont présentés dans le Tableau 8. Comme nous l'avons déjà expliqué, la gestion du transport en amont des AILN Nissan n'est pas faite sur la base des camions complets. C'est pour cela que cet indicateur n'est pas représentatif. En aval, les conteneurs sont remplis à 85% en moyenne, 3 points en dessous de la performance de l'AILN Renault en France. Concernant les taux de service, nous constatons tant en amont qu'en aval qu'ils sont très proches des 100%. En termes de temps d'écoulement, chez Nissan cela se compte en heures, grâce à la planification à la tranche horaire et à la pré-affectation des colis aux conteneurs.

	Amont	Aval
Taux de remplissage	ND	85%
Taux de service journalier	99%	NA
Taux de service hebdomadaire	NA	99%

Tableau 8. Indicateurs de performance, transport amont et aval, AILN Nissan Japon

## 2.6. Problématique industrielle et solution proposée

L'étude de l'existant nous a montré que nous faisons face à une problématique d'optimisation globale des coûts logistiques des AILN, où le transport amont, la main d'œuvre interne, le stockage et le transport aval sont les principaux inducteurs. Le processus associé à cette problématique consiste à planifier toutes les activités dans le réseau logistique. Une problématique qui découle de la première est le pilotage des flux physiques dans l'atelier de l'AILN. Ceci peut être prédéfini dès la phase de planification, ou être fait en deuxième étape.

L'analyse des fonctionnements des AILN Renault et Nissan s'est avérée très enrichissante, Renault et Nissan ayant une philosophie bien différente. La Figure 14 présente un comparatif entre les deux méthodes de planification et ordonnancement dans les AILN. D'une part, Nissan applique une planification qui dure entre 3 et 5 jours, avec plusieurs étapes, dont la vérification des livraisons des fournisseurs, la création des plans de chargement et l'ordonnancement de l'atelier. Ceci permet de prendre en compte les coûts du transport aval, de la main d'œuvre et du stockage. En revanche, le coût du transport amont peut être pénalisé à cause de l'ordonnancement préétabli en interne et en aval. Concernant les flux physiques, le temps d'écoulement moyen d'un emballage est de quatre heures. En règle générale, aucune flexibilité n'est laissée aux opérateurs dans l'atelier et tout aléa nécessite une modification dans le système d'information.

De l'autre côté, Renault a mis en place une planification à la journée qui prend en compte les décalages temporaires et les jours de livraison des fournisseurs. Concrètement, aucun inducteur de coût n'est pris en compte pendant cette phase. Dans l'atelier, les activités se font « au fil de l'eau », pour deux raisons : la flexibilité liée au transport maritime et le fait qu'aucun ordonnancement n'est préétabli. Ces activités sont guidées en grande partie par l'objectif d'assurer un bon taux de remplissage des conteneurs, qui dépend à la fois de l'expertise des opérateurs. Les impacts économiques sur le transport amont et le stockage sont confirmés, mais en termes de main d'œuvre et transport aval nous constatons une bonne performance. En fait, la possibilité de stocker les emballages pendant quelques jours permet d'équilibrer la charge de travail (et par conséquent, la main d'œuvre) et d'optimiser le remplissage conteneurs.

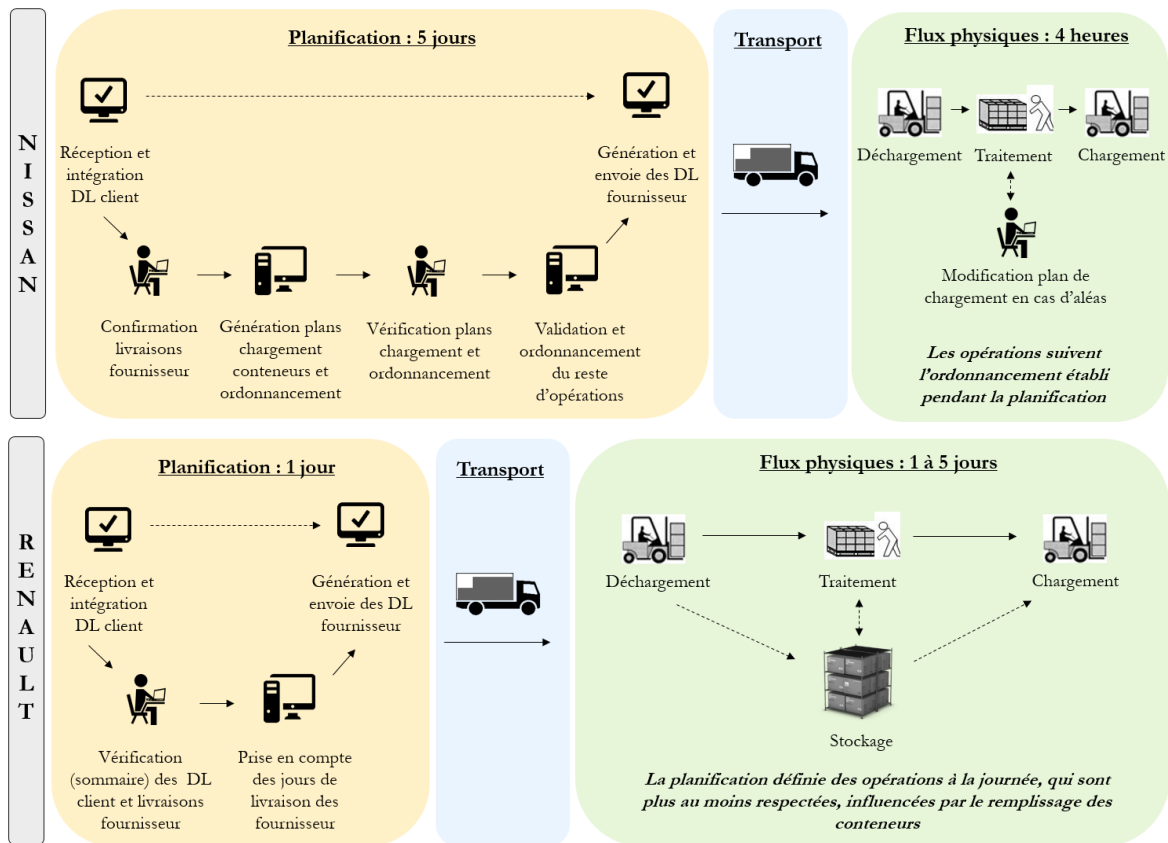


Figure 14. Comparatif entre les méthodes de planification et d'ordonnancement Renault et Nissan

Notre objectif, en termes de solution industrielle pour les AILN Renault, est de proposer une amélioration du processus actuel, en prenant en compte en partie la méthodologie Nissan, mais en gardant certains points forts de Renault. Un grand enjeu de la problématique est l'écart entre la maille des activités amont et internes (journée ou tranche horaire) et le transport aval (hebdomadaire). La méthode de planification Nissan ne tient pas en compte de ce fait et le transport amont doit suivre la programmation faite dans les segments internes et aval. Ceci n'est pas envisageable dans les AILN Renault, notamment car le coût des camions est assez élevé. Nous proposons une méthode de planification qui tient en compte tous les inducteurs de coûts du réseau logistique et qui considère la flexibilité hebdomadaire, particularité des AILN. Ceci va définir les activités journalières pour chaque segment de la chaîne logistique : amont, interne et aval. En deuxième temps, nous proposons une méthodologie pour ordonnancer les opérations journalières, à la tranche horaire, dans l'atelier de l'AILN.

Comme évoqué dans la Section 1.4, nous considérons le fonctionnement des plateformes AILN comme celui des centres de crossdocking connu dans la littérature. Le chapitre suivant décrit l'état de l'art sur les problématiques de crossdocking. Cette analyse est faite pour étudier les modèles connus et pour pouvoir les prendre en compte au moment de la construction des outils d'aide à la décision à la problématique industrielle décrite précédemment.

### 3. Etat de l'art

Les évolutions et les phénomènes décrits dans le Chapitre 1 pour l'industrie automobile se sont étendus à presque toutes les industries. Dans ce contexte, le management de la chaîne logistique est en haut des priorités pour les entreprises d'aujourd'hui. Ce chapitre présente dans la première section l'évolution de la logistique depuis son apparition, avec les changements en raison des phénomènes économiques et sociaux, notamment l'internationalisation des marchés. Dans la deuxième section, les concepts de *warehousing* (entrepôt) et *crossdocking* sont approfondis. Nous nous intéressons par la suite à la classification des principales problématiques liées au *crossdocking* et la caractérisation des plateformes de *crossdock*. Sur cette base, nous définissons le cadre de recherche dans cette thèse et approfondissons les sujets de planification et d'ordonnement du réseau logistique et du centre de *crossdock*. Finalement, nous présentons une synthèse de notre revue de littérature.

#### 3.1. Logistique et internationalisation des marchés

Entre le 19<sup>ème</sup> siècle et la fin de la deuxième guerre mondiale, le terme logistique est utilisé principalement par l'armée et fait référence à la gestion du transport de marchandises entre les points d'origine et les points où se trouvent les troupes. Avec l'arrivée de la production de masse, l'ouverture des marchés et des crises financières dans la première partie du 20<sup>ème</sup> siècle, les entreprises s'intéressent davantage à des nouvelles stratégies pour réduire leurs coûts de production. L'intérêt pour la logistique se développe exponentiellement, et à partir des années 90 elle devient l'un des leviers majeurs de la compétitivité.

The Council of Supply Chain Management Professionals (2013) définit la logistique comme « l'ensemble de processus de planification, implémentation et contrôle des activités pour une gestion efficace et efficiente du transport et du stockage des produits, des services et des flux d'information associés, entre le point d'origine et le point de consommation, tout cela avec l'objectif de satisfaire la demande du client. Cette définition inclut les flux amont, aval, internes et externes ». Dans (Dolgui & Proth 2006 ; 2010) une chaîne logistique est définie comme un réseau d'organisations qui coopèrent pour optimiser le flux de matériel entre le fournisseur et le client, l'optimum étant un flux aussi rapide que possible et le coût de production minimal. L'objectif d'une chaîne d'approvisionnement est la satisfaction du client.

Sur cette base, une chaîne logistique représente le système réunissant fournisseurs, fabricants, distributeurs et détaillants interagissant afin de satisfaire la demande des consommateurs. La gestion des chaînes logistiques suscite beaucoup d'attention aussi bien auprès des industriels que de la recherche académique. Aujourd'hui, elle est considérée comme un élément clé dans la stratégie des entreprises, représentant un levier majeur de génération de valeur vis-à-vis du client (Fiala 2005).

Les divers changements du contexte économique au cours du 20<sup>ème</sup> siècle ont entraîné une transformation de l'ensemble des outils industriels. Jusqu'aux années 60, la production de masse s'est étendue et presque tous les fabricants ont adopté les techniques associées. Avec comme objectif principal la réduction des coûts unitaires de fabrication, la production de masse était supportée par une forte spécialisation du travail, une diversité réduite des produits et des prévisions de ventes fiables. Une des clés du succès de cette méthode était d'avoir un flux de production équilibré, ce qui demandait des investissements importants en termes de stocks en cours.

La deuxième partie du siècle s'est accompagnée d'un développement important des moyens de transport et une ouverture des marchés avec des consommateurs de plus en plus exigeants en termes de coût, mais aussi en termes de qualité, délais et choix de produits. Dans un marché caractérisé notamment par une incertitude croissante et une diversité de la demande en augmentation, des nouvelles techniques sont adoptées afin d'assurer la performance des systèmes de production, notamment le *lean manufacturing*. La mise en place des techniques comme le SMED, le Kanban et les 5S a augmenté notablement la souplesse et la flexibilité des systèmes de production dans tous ses secteurs : machinerie, stockage, transport, flux d'informations, etc., permettant de mieux répondre à la demande des consommateurs. Les stocks sont identifiés comme une des principales sources de gaspillage et pour les réduire au maximum il est nécessaire que le flux de composants et de produits soit le plus tendu possible, c'est-à-dire Juste-à-Temps.

Appliqué initialement aux lignes de production, le *lean manufacturing* se déploie par la suite sur toutes les activités logistiques, en amont et en aval de la fabrication. La gestion de la chaîne logistique commence à se positionner en haut des priorités stratégiques des entreprises. Choon Tan (2001) analyse la littérature autour du management de la chaîne logistique et conclut qu'il y a trois définitions pour ce domaine : (1) il représente l'ensemble d'activités d'achat et des approvisionnements, (2) il décrit les activités logistiques et de transport, (3) il fait référence aux activités qui rajoutent de la valeur. Cette dernière description synthétise ce que les entreprises visent aujourd'hui : n'exécuter que des opérations qui apportent de la valeur.

À partir des années 80 le phénomène d'internationalisation des marchés se développe. Des événements géopolitiques, l'avancement technologique et l'allègement des réglementations ont transformé le contexte économique, générant un basculement de la fabrication *locale pour locale* vers une globalisation des marchés (Christopher et al. 2006). L'achat ou l'exportation des marchandises à l'international rajoute des nouveaux acteurs dans la chaîne logistique, avec des opérations qui prennent de l'importance, comme la gestion de l'approvisionnement à longue distance, la répartition de la responsabilité du suivi de la marchandise, les douanes et la gestion des assurances. Ainsi, la configuration du réseau de distribution est devenue un sujet de plus en plus complexe, qui doit prendre en compte des coûts de transport, de production, des taux de

change, de stockage et de *warehousing* (entreposage). Creazza et al. (2012) soulignent l'importance stratégique des outils d'aide à la décision applicables à des chaînes logistiques globalisées. Wang & Cheng (2010) présentent un cas industriel sur la transformation à Hong Kong, qui est passé d'une ville portuaire à un centre logistique capable d'intégrer une chaîne logistique globale.

En particulier, le transport dans le contexte des approvisionnements à l'international relève des nouveaux défis. Woxenius (2006) caractérise les opérations d'approvisionnement et du transport, sur trois niveaux de distance : régions adjacentes, régions à proximité et régions lointaines. Sur cette dernière configuration, les notions de Juste-à-Temps semblent difficiles à appliquer, vu les variabilités, la taille des lots et les délais. Néanmoins, Das & Handfield (1997) présentent des exemples d'entreprises qui combinent le Juste-à-Temps et les approvisionnements globaux et concluent que la base du succès est liée principalement à une pré-étude approfondie pour identifier les opérations et les composants associés, ainsi qu'à un partage étroit de l'information tout au long de la chaîne logistique. Ce dernier propos est confirmé par Prajogo & Olhager (2012), qui soulignent en particulier le support des nouvelles technologies dans le partage et l'intégrations des chaînes logistiques d'aujourd'hui.

Un dernier point important qui impacte le management des chaînes logistiques est l'arrivée du commerce électronique, dans les années 90. Cela rend la concurrence encore plus féroce, le consommateur devient exigeant et volatile dans sa demande ; stimulé davantage par la facilité liée aux achats sur internet (Masoud & Mason 2016). Dans un tel environnement, la configuration du réseau logistique est une étape essentielle pour concevoir une chaîne logistique réactive dans tous ses échelons (Chibani et al. 2016). Cette réactivité permettra aux entreprises de rester performantes en termes de coûts associés aux activités d'approvisionnement, de transport amont, de production, de marketing, de ventes et de transport aval (Gunasekaran et al. 2008).

En conclusion, afin de rester compétitifs dans l'environnement actuel, les entreprises doivent adapter leurs outils industriels, dont la chaîne logistique. Les flux logistiques s'accroissent et la réduction des stocks inventaires devient un sujet de plus en plus prioritaire ; comment faire pour livrer des produits en temps et en heure, même à l'international, avec des coûts optimaux ? Le crossdocking est une technique *lean* qui répond en bonne partie à cette problématique.

### **3.2. Les entrepôts et les plateformes crossdock**

La plupart des produits transitent par un entrepôt pendant son parcours entre le fournisseur et sa destination finale. Les entrepôts sont considérés comme des centres de stockage, qui s'approvisionnent auprès d'un ensemble de fournisseurs pour répondre aux demandes clients à un instant donné. Ces deux processus sont normalement déphasés. Les objectifs de cette stratégie sont divers : amélioration de la réactivité de la chaîne logistique face à une demande volatile, réduction des coûts de production chez les fournisseurs (en augmentant la taille des lots

de fabrication, réduction des coûts de transport grâce à la consolidation des produits, possibilité de finaliser (personnaliser) les produits au plus proche du client. En général, toutes les opérations réalisées dans un entrepôt rentrent dans une des catégories suivantes : réception, stockage, préparation (reconditionnement, picking) et expédition. Dans Dolgui et al. (2005) deux taxonomies associées aux entrepôts sont présentées. La première est basée sur le type de clients desservis. Quatre groupes y sont définis :

- Approvisionnement de détaillants : gestion de produits finis en provenance d'un système de manufacture pour servir de point de stockage et de livraison aux magasins détaillants.
- Approvisionnement pièces (détachées) : livraison de pièces de rechange ou d'assemblages dans un système de manufacture. La demande peut être très variable, avec un nombre réduit de pièces.
- Vente par catalogue : les commandes sont passées à distance (Internet principalement). Il s'agit généralement de petites quantités sur une diversité de produits qui peut être très importante.
- Stockage ponctuel sur des produits assez volumineux, chers et peu demandés.

La deuxième classification correspond plutôt aux fonctions assurées par l'entrepôt :

- Services de distribution offerts par une entreprise privée (type DHL), qui a son propre réseau d'entrepôts et qui travaille pour plusieurs clients.
- Besoins ponctuels de stockage : entrepôts (ou une partie) qui sont loués pour une période de temps fixe.
- Opérations à valeur ajoutée, comme le reconditionnement (repackaging), l'étiquetage ou l'assemblage.
- Distribution de petits lots d'une offre très diversifiée de marchandises, sur la base de réception de grandes quantités de chaque type de produit.
- Livraisons fréquentes pour répondre à un système (de production) juste-à-temps.
- Distribution de produits alimentaires frais, où l'atelier est réfrigéré.

Nous orientons les lecteurs intéressés vers les travaux de Gu et al. (2007) et de Gu et al. (2010), qui présentent des études sur le design, l'opération et les mesures de performances des entrepôts.

Dans ce cadre, les plateformes logistiques Renault (AILN) peuvent être caractérisées ainsi : elles servent pour l'approvisionnement des pièces dans un cadre d'un système productif juste-à-temps, elles peuvent réaliser des opérations de repackaging pour répondre aux caractéristiques du transport aval et aux besoins de leurs clients (usines). Les activités effectuées dans l'atelier correspondent bien à l'ensemble des catégories listées auparavant (réception, stockage, préparation reconditionnement, picking et expédition). En revanche, le déclenchement des

commandes auprès de fournisseur passe impérativement par l'expression d'un besoin client. Ceci représente une grande différence entre le fonctionnement des plateformes AILN et un entrepôt traditionnel. Le temps d'écoulement entre la réception d'un produit et son expédition est significativement plus important. Les définitions synthétiques apportées par Mocellin (2006) sur les entrepôts (*warehouse*) et les plateformes (*crossdock*) permettent d'illustrer nos propos précédents :

- « L'entrepôt est une zone de stockage où des produits sont entreposés pendant un certain temps, avant d'être utilisés en l'état ou transformés ».
- « La plateforme crossdock est au contraire une zone de stockage temporaire, par laquelle les produits transitent quelques heures avant d'être réexpédiés vers une autre destination ».

Ces deux types d'entités représentent des points intermédiaires dans une chaîne logistique, où la marchandise est réceptionnée, stockée, transformée (si besoin) et finalement expédiée. Elles sont liées à des stratégies différentes. Le principal avantage économique associée est la réduction des coûts de transport, grâce à la consolidation. Outre ces caractéristiques communes, chaque stratégie répond à des besoins différents : l'entrepôt joue principalement un rôle de régulateur de la demande, pour faire face à des contraintes spécifiques du réseau logistique, tandis que la plateforme crossdock a une vocation de réorientation des flux, où les produits ne resteront pas longtemps dans l'atelier. Néanmoins, une analyse poussée sur la gestion des stocks s'avère nécessaire pour ne pas dégrader la performance suite à la mise en place du crossdocking (Waller et al. 2006).

Napolitano (2000) expose une analyse comparative entre les approches de distribution traditionnelles et la stratégie de crossdocking. Kregg & Chen (2008) analysent les bénéfices de l'utilisation des centres de crossdock en comparaison avec des entrepôts traditionnels. Sur ces bases, la Figure 15 caractérise les différentes techniques de distribution. Le premier schéma de flux correspond à une liaison directe entre les clients et ses fournisseurs. A condition de travailler à flux juste-à-temps, cette technique de distribution permet de réduire au maximum le niveau d'inventaire et le coût de manipulation de la marchandise, mais demande un niveau important de synchronisation. Dans ce cas, le coût du transport peut être assez élevé, en raison des livraisons en petits lots. Le deuxième schéma représente la distribution des produits à travers un entrepôt, entité qui centralise et les flux d'information et les flux physiques. L'entrepôt doit se réapprovisionner et stocker les produits en attendant la demande des clients, c'est-à-dire que les commandes aux fournisseurs ne sont pas directement corrélées avec les demandes clients. Le niveau nécessaire de synchronisation n'est pas très haut et ce fonctionnement permet de palier à des contraintes liées à l'incertitude ou à la production. Comme l'entrepôt s'approvisionne auprès de fournisseurs pour ensuite répondre aux demandes clients, le coût de manipulation de la marchandise est élevé et les niveaux d'inventaire et de surface nécessaires sont plus



importants. En revanche, le transport est peu coûteux : entre le fournisseur et l'entrepôt les commandes sont associées à des camions complets ; entre l'entrepôt et les clients il y a le processus de consolidation des produits de plusieurs fournisseurs vers un même client, ce qui permet, en expédition, de faire des camions très bien remplis.

Finalement, nous analysons la stratégie de distribution via le crossdocking. La principale différence avec les entrepôts est que le flux de marchandise est tiré uniquement par des demandes clients. Ceci permet de minimiser le niveau d'inventaire et le coût de manipulation, tout en gardant l'avantage économique de la consolidation des produits, mais demande un fort degré de synchronisation entre tous les acteurs. Comme dans le cas des entrepôts, les flux physiques sont centralisés. La centralisation du flux d'information n'est plus impérative, car les commandes auprès des fournisseurs correspondent à des besoins clients et les clients envoient leurs demandes soit à la plateforme ou directement aux fournisseurs. Le fonctionnement des AILN est très proche aux centres de crossdock.

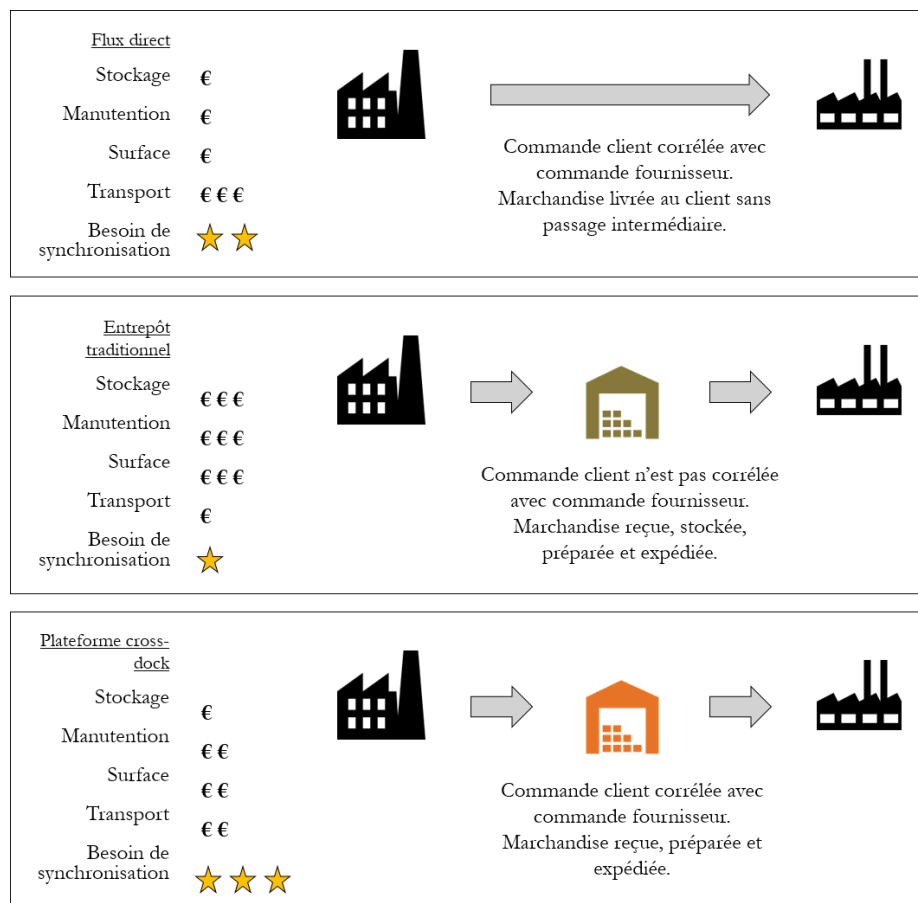


Figure 15. Stratégies de distribution et ses caractéristiques principales. Adaptée de Napolitano (2000)

Pour synthétiser, voici une définition proposée par le Council of Supply Chain Management Professionals (2013), sur le crossdocking : « système de distribution dans lequel la marchandise

reçue dans l'entrepôt n'est pas stockée, mais aussitôt préparée pour l'expédition. Le crossdocking demande une synchronisation étroite entre les flux entrants et sortants. Grâce à l'élimination du stockage et le *picking*, cette stratégie peut réduire significativement les coûts de distribution ».

Depuis plusieurs années, le crossdocking reçoit beaucoup d'attention dans l'industrie. Ratliff et al. (1999) présente une étude sur la distribution par crossdocking de véhicules finis du constructeur Ford, aux États-Unis. Palmer (2005) développe une étude industrielle sur la chaîne logistique globale de la compagnie Kodak, avec un focus sur les centres de crossdocking et le lissage de la charge. Gue (2007) souligne un croisement des flux logistiques dans l'industrie aux États-Unis et proposent différentes stratégies pour implémenter le crossdocking. Vogt (2010) analyse le rôle des centres de crossdock dans les chaînes logistiques sur la base des visites à plus de 20 plateformes de 6 secteurs industriels différents, situées sur 4 continents.

Dans un contexte industriel, la corporation Saddle Creek Logistics Services (2011) présente les résultats d'une enquête auprès de plus de 200 acteurs dans le domaine logistique, focalisée sur le crossdocking. 40% des répondants considèrent que les conditions actuelles ont entraîné une augmentation des opérations autour du crossdocking.

Tableau 9 liste les bénéfices identifiés par les industriels. Les sujets autour de la qualité de la distribution représentent un tiers des réponses, avec l'amélioration du taux de service en premier. La réduction du coût de la distribution, grâce à la consolidation de produits, est en deuxième catégorie. Finalement, le coût et la qualité des opérations dans l'entrepôt se situent, respectivement, en troisième et quatrième position. Ces résultats supportent les analyses présentées dans les sections précédentes de la thèse.

<b>Distribution (qualité)</b>		<b>34,1%</b>
Amélioration du taux de service	19,4%	
Accélération des flux logistiques	10,2%	
Adaptation au Juste-à-Temps	4,5%	
<b>Distribution (coût)</b>		<b>27,4%</b>
Réduction du coût de transport	14,3%	
Consolidation des produits	13,1%	
<b>Opérations dans l'entrepôt (coût)</b>		<b>18,2%</b>
Réduction de surface de l'entrepôt	8,5%	
Réduction du coût de stockage	5,7%	
Réduction du coût de main d'œuvre	4,0%	
<b>Opérations dans l'entrepôt (qualité)</b>		<b>12,0%</b>
Amélioration de la gestion de stock	8,0%	
Personnalisation des produits	4,0%	
<b>Autres</b>		<b>8,3%</b>

Tableau 9. Bénéfices du crossdocking (Saddle Creek Logistics Services 2011)

### 3.3. Classification des problèmes autour du crossdocking

Nous nous intéressons à la manière de classifier les problématiques et de positionner les décisions associées car cela représente un élément important. Notre travail avec les AILN Renault et Nissan nous a permis de constater l'importance de ce sujet, notamment la synchronisation entre les activités du réseau logistique et les opérations internes de la plateforme. Sept articles de revue de la littérature concernant des problèmes dans un centre de crossdock ont été identifiés. La Figure 16 présente la chronologie de ces articles, ainsi que leur apport principal, d'après notre analyse.

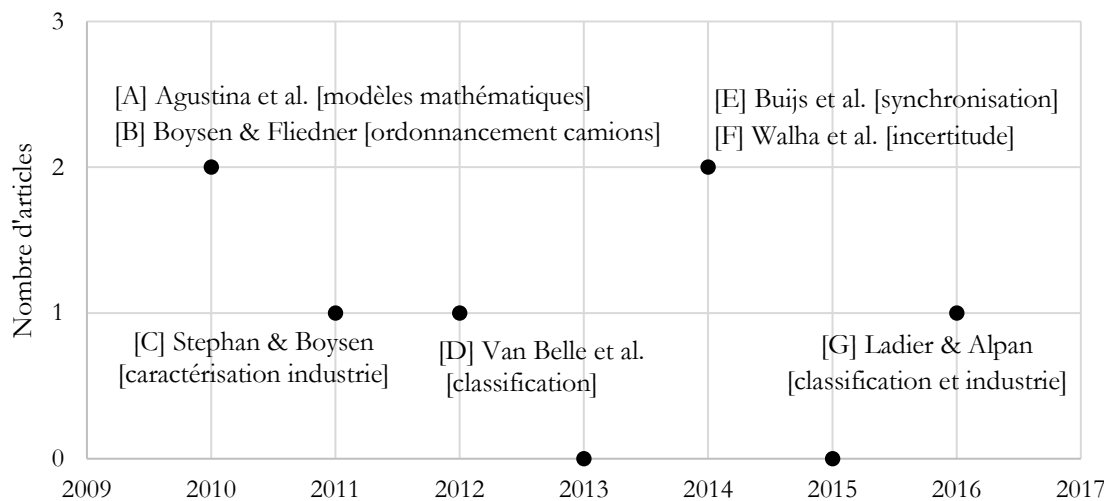


Figure 16. Chronologie des revues de littérature en crossdocking entre 2010 et 2016

La revue de littérature présentée par Walha et al. (2014) se focalise sur les impacts de l'incertitude dans le crossdocking. La planification et l'ordonnancement des activités sont sans doute impactés par l'incertitude générée par des facteurs externes, comme les temps d'arrivée et le contenu des camions, ainsi que par des facteurs d'incertitude internes, comme le temps d'écoulement des colis et la période de départ des camions. Les auteurs ont identifié douze articles incluant un ou plusieurs facteurs dans la modélisation et les méthodes proposées pour les traiter. Dans cette thèse nous ne proposons pas des modèles stochastiques, mais l'incertitude est d'une certaine manière traitée dans notre cas industriel : il s'agit du processus qui consiste à vérifier au préalable la capacité des fournisseurs à livrer les pièces demandées. Dans le reste de la section, nous nous focalisons sur les taxonomies proposées autour du crossdocking et les problématiques associées.

Agustina et al. (2010) se focalisent sur les modèles mathématiques et adoptent une classification par rapport au niveau décisionnel. La synthèse est présentée dans le Tableau 10, qui liste également des pistes pour la recherche future. Au niveau opérationnel, le sujet

d'ordonnancement de camions est celui qui a reçu le plus d'attention. L'objectif des modèles mathématiques associés est de déterminer les temps d'arrivée et de départ des camions afin de minimiser les coûts logistiques. Le problème de transbordement, qui vise à définir les flux (quoi et quand) entre les nœuds d'un réseau logistique incluant un ou plusieurs centres de crossdock. L'affectation des portes est une problématique qui cherche à lier les portes du centre de crossdock avec des points d'origine et/ou des points de destination. Ce choix va impacter la distance que les produits devront parcourir dans l'atelier. Finalement, les auteurs considèrent que les sujets sur les tournées de véhicules et affectation des produits n'ont pas reçus suffisamment d'attention (2 articles pour chacun). La seule problématique identifiée pour les décisions tactiques est la définition de l'agencement de l'atelier. Ceci est considéré comme une donnée d'entrée pour les modèles opérationnels et en conséquence va impacter sa performance. Les décisions à long terme concernent la conception du réseau logistique. L'objectif des modèles est de déterminer les flux de produits entre les différents nœuds, qui incluent des centres de crossdock. Des décisions sur la localisation et le nombre de véhicules à mettre à disposition sont également traitées. Une des conclusions de l'étude est qu'il y a peu des modèles qui cherchent à résoudre deux problématiques ensemble, comme par exemple l'ordonnancement des camions et l'affectation des portes.

	<b>Opérationnel</b>	<b>Tactique</b>	<b>Stratégique</b>
Problématique associée	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ordonnancement de camions.</li> <li>2. Transbordement.</li> <li>3. Affectation de portes.</li> <li>4. Tournées de véhicules.</li> <li>5. Affectation de produits.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Agencement physique.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Conception du réseau logistique.</li> </ol>
Recherche future	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Développement de modèles spécifiques à chaque industrie.</li> <li>▪ Ordonnancement en temps réel.</li> <li>▪ Modèles qui traitent plusieurs problématiques ensemble.</li> </ul>	Inclure l'arrangement des zones à l'intérieur du crossdock.	Associer une vision stratégique au niveau global, pour fournir un outil d'aide à la décision à l'entreprise.

Tableau 10. Classification des problématiques autour du crossdocking et sa recherche future (Agustina et al. 2010)

Boysen & Fliedner (2010) listent sept domaines de recherche associés au crossdocking. Ils sont présentés dans la Figure 17, organisés du niveau stratégique au niveau opérationnel. Leur travail est focalisé sur l'ordonnancement des camions. Ainsi, les deux premiers sont considérés comme des données d'entrée pour le problème étudié : ils considèrent un crossdock déjà en place avec une localisation géographique fixe et un agencement physique défini. Si les décisions liées à l'affectation des portes et aux tournées de véhicules (en amont et en aval du crossdock) sont traitées au niveau tactique (en les fixant pour des horizons d'un mois par exemple), elles

seront également des données d'entrée pour l'ordonnancement de camions. Cependant, elles peuvent être considérées au niveau opérationnel et ainsi faire partie des décisions du problème étudié. Sur ce point, les auteurs considèrent les tournées de véhicules comme un sujet tactique et l'affectation de portes comme un problème opérationnel, traité en même temps que l'ordonnancement de camions. En ce qui concerne l'ordonnancement des ressources internes, ils estiment pertinent d'inclure quelques notions, comme le temps moyen de traitement des colis, mais il semblerait difficile d'intégrer l'affectation détaillée des opérations aux ressources (opérateurs, machines). Finalement, les auteurs considèrent qu'il n'est pas pertinent de mettre en corrélation l'activité de (dé)chargement de colis avec l'ordonnancement des camions. En amont, les contenus des camions sont généralement connus et en aval, cela représenterait une liaison avec les tournées de véhicules, en chargeant les colis dans les camions par rapport à l'ordre des visites chez les clients.

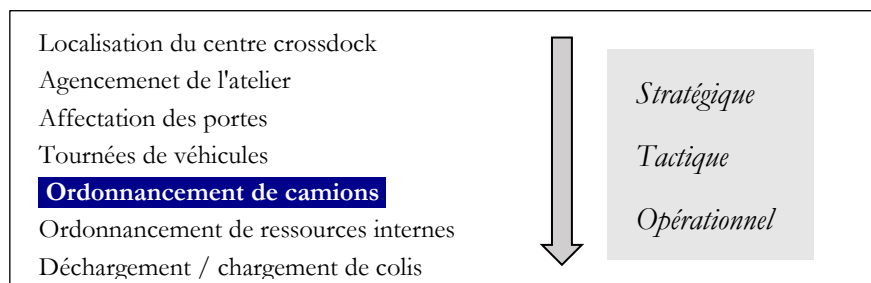


Figure 17. Problématiques autour du crossdocking étudiée par Boysen & Fliedner (2010)

Van Belle et al. (2012) proposent aussi une classification par niveau décisionnel. Ainsi, au niveau stratégique, nous retrouvons la localisation géographique du crossdock et l'agencement de l'atelier, deux sujets qui sont écartés de notre périmètre d'étude. La problématique du transbordement est positionnée au niveau tactique (Agustina et al. (2010) le considèrent au niveau opérationnel). Les auteurs poursuivent leur analyse avec le problème des tournées des véhicules, qu'ils positionnent entre les niveaux tactique et opérationnel. Ainsi, il existe des travaux qui visent à minimiser la distance parcourue par des véhicules chargés chez les fournisseurs pour transporter et décharger des produits dans le centre de crossdock, pour ensuite répartir chargés pour les distribuer vers les clients. Au niveau opérationnel, l'ordonnancement des camions reste la problématique la plus étudiée.

La revue de littérature développée par Ladier & Alpan (2016) est focalisée sur les problématiques opérationnelles dans un centre de crossdock. Le problème cœur reste l'ordonnancement des camions, à partir duquel se découlent 5 sous problèmes. Ces 5 problèmes vont inclure, en particulier, les problèmes d'affectation des portes et d'ordonnancement des ressources. La prise en compte des dimensions spatio-temporelles est un facteur de classification. Par exemple, l'affectation des portes comporte une notion spatiale et donc la décision va impacter la distance parcourue par les produits entre leur déchargement (en entrée

du crossdock) et leur chargement (en sortie). La définition des temps d'arrivée/départ des camions permet, par exemple, de définir le temps passé par les produits dans le crossdock. Le Tableau 11 décrit les 5 problématiques, avec les décisions et les objectifs communément étudiés. Les travaux associés considèrent un centre de crossdock avec des ressources disponibles (humaines et matérielles) où un ensemble défini de camions sera traité pour un ensemble donné de portes. Cela peut s'appliquer pour l'arrivée ou le départ des camions uniquement, ou les deux en même temps.

Problématique	Rapport nombre de camions / nombre de portes	Décision(s)	Objectif(s)
[1] Affectation camions-portes	Nombre de camions $\leq$ nombre de portes	Affectation des camions aux portes (quelle porte ?)	Minimiser la distance entre portes (arrivée/départ) des parcours des produits.
[2] Séquencement de camions	Nombre de camions $>$ nombre de portes	Séquence de traitement des camions (dans quel ordre ?)	Minimiser le temps d'écoulement des produits et le niveau de stockage.
[3] Ordonnancement de camions		Temps d'arrivée/départ des camions (quand ?)	Minimiser le temps d'écoulement des produits, le niveau de stockage et le temps de traitement des camions.
[4] Séquencement camions-portes		Affectation des camions aux portes ET la séquence de traitement	Ceux des problématiques [1] et [2]
[5] Ordonnancement camions-portes.		Affectation des camions aux portes ET les temps d'arrivée/départ	Ceux des problématiques [1] et [3]

Tableau 11. Problématiques opérationnelles autour du crossdocking présentées par Ladier & Alpan (2016)

Dans une autre revue de littérature, Buijs et al. (2014) présentent les problématiques liées à un centre de crossdock, classifiées par niveau décisionnel. Ils constatent que, malgré une interdépendance existante, la littérature actuelle traite, en général, les problèmes d'une façon isolée. L'objectif est de fournir un cadre d'étude sur la coordination des problématiques autour du crossdocking. La première différenciation entre les problèmes traités consiste à séparer les sujets traitant des problématiques locales (*management des opérations dans le crossdock*) et les sujets liés au réseau logistique (*management du réseau logistique du crossdock*). Cette distinction entre ces problèmes et le lien entre eux nous paraît très pertinente ; notre cas d'étude nous a montré qu'il existe une forte relation entre les décisions au niveau du réseau logistique et celle au niveau de l'atelier du crossdock. Ensuite, les auteurs positionnent six catégories de problèmes, en utilisant la notion du niveau décisionnel (stratégique, tactique, opérationnel), comme le montre la Figure 18. Les catégories [1] et [2] relèvent des décisions stratégiques, le reste de catégories contiennent des sujets qui seront traités par notre travail de recherche. La plupart de ces sujets ont été

introduits dans les paragraphes précédents de cette section. Mais le plus intéressant du travail de Buijs et al. (2014) est l'étude des interdépendances horizontales et verticales qui existent entre les différentes catégories de problèmes. Sur cette base, ils proposent deux cadres d'étude pour la coordination : le premier concerne les décisions tactiques-stratégiques et le deuxième se focalise sur les décisions opérationnelles. Dans les deux cas, les problématiques traitées utilisent des données d'entrée et des contraintes des autres catégories.

	Management des opérations dans le crossdock	Management du réseau logistique du crossdock
Stratégique	[1] Conception crossdock <i>Forme, surface nécessaire, type de ressources (automatiques ou non)</i>	[2] Conception réseau logistique <i>Installations à utiliser, nombre et localisation des crossdocks, liaisons de transport</i>
Tactique	[3] Planification crossdock <i>Affectation des portes, planification des ressources et des surfaces.</i>	[4] Planification réseau logistique <i>Capacité des transports, tournées de véhicules</i>
Opérationnel	[5] Ordonnancement crossdock <i>Ordonnancement de camions, de ressources. Affectation produits-zone d'attente-camions.</i>	[6] Ordonnancement réseau logistique <i>Affectation produits aux transports disponibles, tournées de véhicules.</i>

Figure 18. Problématiques autour du crossdocking (Buijs et al. 2014)

### 3.4. Configuration du centre de réseau logistique et du centre de crossdock

Nous nous intéressons également à la configuration d'un centre de crossdock. Celle-ci est caractérisée par deux éléments : le mode opératoire (au niveau stratégique, tactique et opérationnel) ainsi que les inducteurs de coûts qui sont pris en compte.

Stephan & Boysen (2011) proposent une caractérisation des centres de crossdock dans différents contextes industriels. Elle est représentée dans la Figure 19. Trois principaux critères y sont considérés : (1) la localisation dans la chaîne logistique, (2) le moyen de transport des colis à l'intérieur de la plateforme et (3) les opérations à valeur ajoutée réalisées dans l'atelier. Quatre types d'industries sont analysés, dont l'industrie automobile. Les centres de crossdock qui se situent proche des usines sont considérés, ils vont avoir comme principale activité faire une déconsolidation des pièces approvisionnées auprès des fournisseurs lointains. Le transport à l'intérieur du centre est très automatisé. Les opérations sont en elles-mêmes considérées comme à valeur ajoutée, mais il peut également y avoir d'autres activités, comme la préparation des kits ou le repackaging. La classification des AILN est présentée dans la Figure 19.

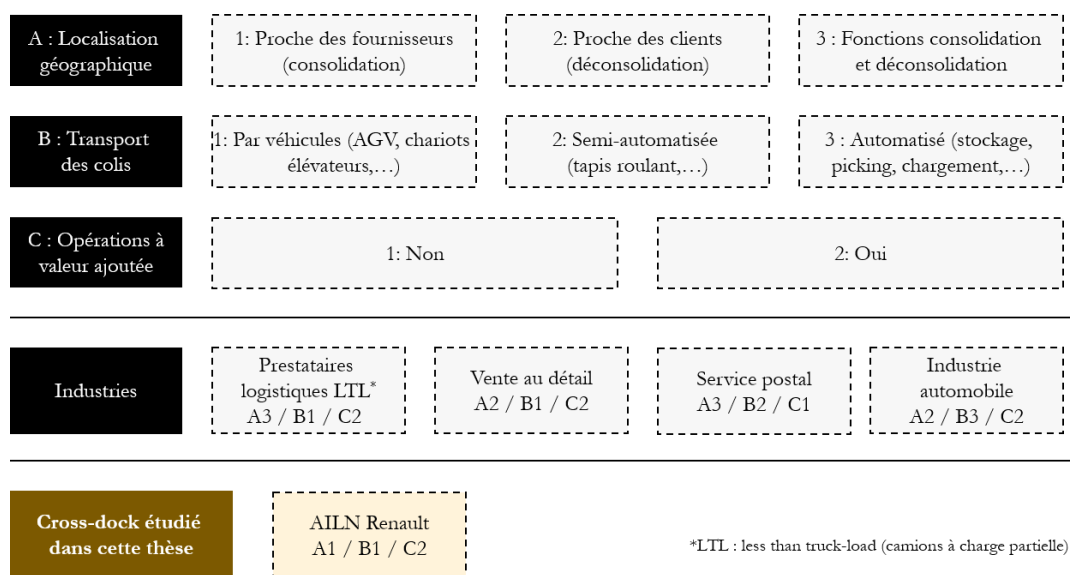


Figure 19. Classification des centres de crossdock, par type d'industrie (Stephan & Boysen 2011)

Notre classification diffère de celle donnée par Stephan & Boysen (2011), pour les centres de crossdock de l'industrie automobile, car les AILN de l'industrie automobile sont proches des fournisseurs, le transport de colis est principalement réalisé par des chariots élévateurs et des opérations de repackaging y sont effectuées sur une partie des colis.

Nous nous basons sur le travail de Buijs et al. (2014) et sur notre cas industriel pour décrire la configuration d'un réseau logistique avec crossdocking. Ladier & Alpan (2016) listent les éléments caractérisant le mode opératoire d'un centre de crossdock, ainsi que les inducteurs de coûts associés. Ces éléments sont présentés par la suite, organisés par niveau décisionnel. Nous les utilisons également et y ajoutons quelques caractéristiques issues de notre cas industriel.

### 3.4.1. Niveau stratégique

Le mode opératoire du réseau logistique, au niveau stratégique, peut être caractérisé ainsi :

- Nombre de crossdocks : le nombre de centres de crossdock disponibles dans le réseau logistique.
- Nombre de niveaux : fait référence au nombre de niveaux intermédiaires (crossdocks ou entrepôts) entre les fournisseurs et les clients.
- Routes de transport : s'il existe des contraintes sur les liaisons entre les différents nœuds du réseau, l'on considère que les routes de transport sont *restreintes*. Dans le cas contraire, l'on dit qu'elles sont *sans restriction*.



En ce qui concerne le(s) centre(s) de crossdock, au niveau stratégique nous retrouvons :

- Nombre de portes : fait référence au nombre de quais de chargement/déchargement disponibles dans le centre de crossdock. Si le mode de service est exclusif (cette notion est expliquée par la suite), une distinction est faite entre les portes d'arrivée et les portes de départ.
- Transport des produits dans l'atelier : il peut être *automatisé* (tapis roulant), *manuel* (opérateurs, chariot-élévateur) ou une combinaison des deux (*combiné*).
- Repackaging : *oui* si certains produits peuvent subir des opérations de conditionnement (ex. : changement d'emballage, groupement) ou au contraire, aucune opération n'est réalisée sur leur emballage d'origine (*non*).

### 3.4.2. Niveau tactique

Au niveau tactique, les éléments principaux caractérisant le réseau logistique autour du crossdocking sont :

- Flux directs : possibilité (*oui*) ou pas (*non*) de faire transiter les produits depuis les fournisseurs vers les clients, sans passer par un centre de crossdock.
- Flux de produits : la demande de produits peut être caractérisée par des couples *origine-destination*. Cette contrainte sera intégrée dans la définition des tournées de véhicules. En revanche, si les points de destination expriment leur demande par type de produit, le transport aura plus de flexibilité grâce à l'interchangeabilité des produits. Dans ce cas, l'on parle d'une demande *agrégée*.
- Types de produits : le réseau logistique peut être *mono-produit* ou *multi-produit*.
- Emballage des produits : si l'on retrouve plusieurs types de produits et que l'emballage diffère d'un type à l'autre, ce paramètre est dit *diversifié*. Dans le cas contraire, les produits sont emballés de manière *équivalente*. Cet élément est impactant vis-à-vis de la charge de travail et de l'activité de chargement des camions.

Concernant le(s) crossdock(s), les principales caractéristiques sont :

- Mode de service : si les portes sont utilisées pour une seule opération (chargement OU déchargement), le mode de service est *exclusif*. Si les deux sont possibles, le mode de service est *mixte*. Finalement, si une partie des portes travaille en mode exclusif et l'autre en mode mixte, l'on parle d'un mode de service *combiné*.
- Interruption du (dé)chargement : l'arrêt des opérations de chargement ou déchargement des camions dans les quais peut être *accepté* ou *interdit*. Suite à l'interruption, les camions (ou les remorques) sont mis en attente (ex : dans un parking proche) jusqu'à la reprise de l'opération.
- Stockage : fait référence à l'espace disponible dans l'atelier pour les produits qui sont en attente de chargement. Cette capacité peut être *zéro*, *limitée* ou *illimitée*.

- Capacité de traitement : peut être considéré étant *limitée* ou *illimitée*. Il s'agit par exemple du nombre de colis à traiter par heure ou la capacité des ressources internes (humaines ou matériels).

### 3.4.3. Niveau opérationnel

Au niveau opérationnel la plupart des éléments caractérisant le réseau logistique sont liés aux tournées de véhicules. Etant donné que nous ne traitons pas directement cette problématique (les tournées sont prédéfinies par Renault) nous orientons les lecteurs intéressés vers la littérature associée. Une taxonomie des différentes variantes des problèmes de tournées de véhicules est proposée par Eksioglou et al. (2009) et une revue de la littérature sur ce sujet est présentée par Braekers et al. (2016). De même, plusieurs travaux disponibles dans la littérature actuelle traitent le problème des tournées de véhicules dans un réseau logistique avec crossdocking (Lee et al. 2006 ; Wen et al. 2009 ; Redi & Yu 2013 ; Agustina et al. 2014 ; Cóccola et al. 2015 ; Maknoon & Laporte 2017).

Néanmoins, nous listons ci-dessous quelques caractéristiques qui nous paraissent pertinentes sur notre périmètre de recherche :

- Fenêtres de temps : les contraintes liées aux temps de ramasse (ou livraison) de produits (ou camions) peuvent être des contraintes *fortes*, si elles doivent être totalement respectées, ou *souples*, si elles peuvent être modifiées. Ces modifications sont généralement liées à des pénalités, mais donnent plus de flexibilité aux décisions de transport et de flux des produits.
- Capacité de camions : peut faire référence au *nombre maximal de produits* qui peuvent être chargés (et donc l'on considère que tous les produits sont conditionnés dans le même emballage). La capacité des camions est *dimensionnelle*, si elle est liée à une valeur maximale, comme le volume ou le poids. Dans tous les autres cas l'on considère que la capacité est *non prise en compte* (ex. : si le contenu des camions est défini à l'avance).

Pour la caractérisation des crossdocks, au niveau opérationnel, les éléments sont :

- Affectation des produits : si le contenu des camions au départ du crossdock est prédéfini l'on parle d'un mode distribution. Au contraire, dans le mode *destination*, la seule information connue est le client final des produits. Il existe deux possibilités pour le mode distribution : la *pré-distribution*, où chaque produit est pré-affecté à un camion et la *post-distribution* où l'information disponible sur le contenu des camions consiste en une liste de types de produits à charger.
- Interchangeabilité des produits : un produit est dit interchangeable (*oui*) s'il peut remplacer un autre dans un camion en départ du crossdock. Cela s'applique

notamment aux modes d'affectation *post-distribution* et *destination*. Pour le mode *pré-distribution* l'interchangeabilité n'est pas possible (*non*).

- Temps d'arrivée : l'arrivée des camions (et donc des produits) peut être *concentrée*, si tous les camions sont disponibles au début de l'horizon de planification. Au contraire, les temps d'arrivée peuvent être donnés *par camion*. Il faut souligner que cette information concerne autant les camions qui vont être déchargés, comme ceux qui seront chargés.
- Temps de départ : les temps de départ des camions peuvent être *restreints* (avant une telle heure ou une heure fixe) ou *sans restriction*. Comme pour les temps d'arrivée, ceci s'applique aux camions en amont et en aval du centre de crossdock.

#### 3.4.4. Inducteurs de coûts

En termes d'éléments influençant le coût du réseau logistique, nous retrouvons les indicateurs listés ci-dessous :

- Nombre de nœuds intermédiaires ouverts : l'ouverture des points intermédiaires (crossdock, entrepôt, etc.) est généralement liée à un coût fixe de fonctionnement.
- Utilisation des capacités : liée aux à l'utilisation des moyens de transport et des centres intermédiaires.
- Transport : la minimisation du coût de transport est un des principaux objectifs dans les problèmes du réseau logistique. Il est souvent représenté par le *nombre de camions* utilisés, mais cela peut être caractérisé par des coûts variables *par produit transporté* ou par la *distance* parcourue.
- Niveau de stockage : fait référence au niveau de stock total dans les nœuds intermédiaires du réseau logistique.
- Pénalités : le non-respect des fenêtres de temps, le non-passage par les centres de crossdock, l'utilisation des camions supplémentaires peuvent générer des coûts de pénalité.

Pour le centre de crossdock, les principaux indicateurs de performance sont :

- Durée de l'opération (*makespan*) : fait référence au temps total passé entre la première et la dernière opération.
- Lissage de la charge : une répartition équitable de la charge de travail peut être un des objectifs dans un crossdock. Cette mesure peut être prise au niveau des ressources (ex : même charge pour chaque opérateur) ou au niveau des périodes de temps (même charge, au total, pour chaque heure ou journée de travail).
- Distance parcourue : associée au déplacement des produits dans le crossdock.
- Temps de séjour : fait référence au temps que passent les produits dans l'atelier du centre de crossdock.

- Temps de chargement et/ou déchargement : liées aux opérations réalisées auprès des camions (en entrée et en sortie).
- Niveau d'utilisation des portes : en fort rapport avec l'indicateur précédent.
- Ecart de l'arrivée ou du départ des camions : mesure la variation entre l'arrivée (ou départ) réels des camions par rapport aux temps planifiés à l'avance.
- Nombre de touches : nombre total de fois que les produits sont touchés.

Dans les deux sections qui suivent nous allons préciser le cadre de notre étude, sur la base des analyses précédentes. Nous parlerons de deux catégories principales : la planification des flux dans le réseau logistique autour du crossdocking (transbordement) et l'ordonnancement (et séquençement) des camions dans un centre de crossdock.

### 3.5. Définition du périmètre de recherche associé au cas industriel étudié

Les différentes analyses présentées dans les deux sections précédentes nous ont permis de positionner l'ensemble des problématiques autour du crossdocking et de cibler notre périmètre en accord avec le cas industriel étudié dans cette thèse. Nous allons nous baser sur la méthodologie proposée par Buijs et al. (2014) pour caractériser les sujets que nous allons aborder. La première problématique identifiée à l'issue de l'analyse du cas industriel (*planification des flux dans un centre de crossdock et le réseau logistique associé*) est illustrée dans la Figure 20. Il s'agit d'un problème de transbordement dans un réseau logistique qui inclut un ou plusieurs centres de crossdock. Ce problème relève des décisions tactiques à la fois dans le crossdock et dans le réseau logistique. Ces décisions concernent le dimensionnement des ressources et du niveau de stockage (internes au crossdock), le nombre de camions à utiliser (en amont et en aval du crossdock) et les flux de produits (entre les fournisseurs, le crossdock et les clients). Les principales contraintes concernent la capacité de stockage et de repackaging, ainsi que les tournées de véhicules et les demandes clients. Deux contraintes stratégiques sont incluses et concernent la situation géographique (crossdocks à utiliser) et le mode de service des portes : les centres de crossdock que nous considérons comportent un ensemble de portes utilisées uniquement pour la réception et un autre dans lequel l'on effectue exclusivement l'opération d'expédition.

La deuxième problématique identifiée (*ordonnancement des activités dans l'atelier de la plateforme logistique*) relève de décisions opérationnelles. Elle est schématisée dans la Figure 21. Sur la base de la classification présentée par Ladier & Alpan (2016) nous identifions deux sujets associés : l'ordonnancement et le séquençement des camions, en arrivée et en départ de la plateforme de crossdock. En intégrant des contraintes issues des décisions tactiques, comme la capacité de stockage, le dimensionnement des ressources et le nombre de camions à charger, l'on vise à ordonnancer les opérations dans l'atelier du crossdock et réseau logistique. Dans le crossdock, cet ordonnancement consiste à établir les temps d'arrivée et départ des camions, tout comme le

flux entre les différentes zones de l'atelier : déchargement, stockage, repackaging et chargement. Côté réseau logistique, la principale décision consiste à affecter les produits aux transports disponibles, en intégrant les fenêtres de temps prédéfinies pour l'arrivée des camions (information liée aux tournées de véhicules).

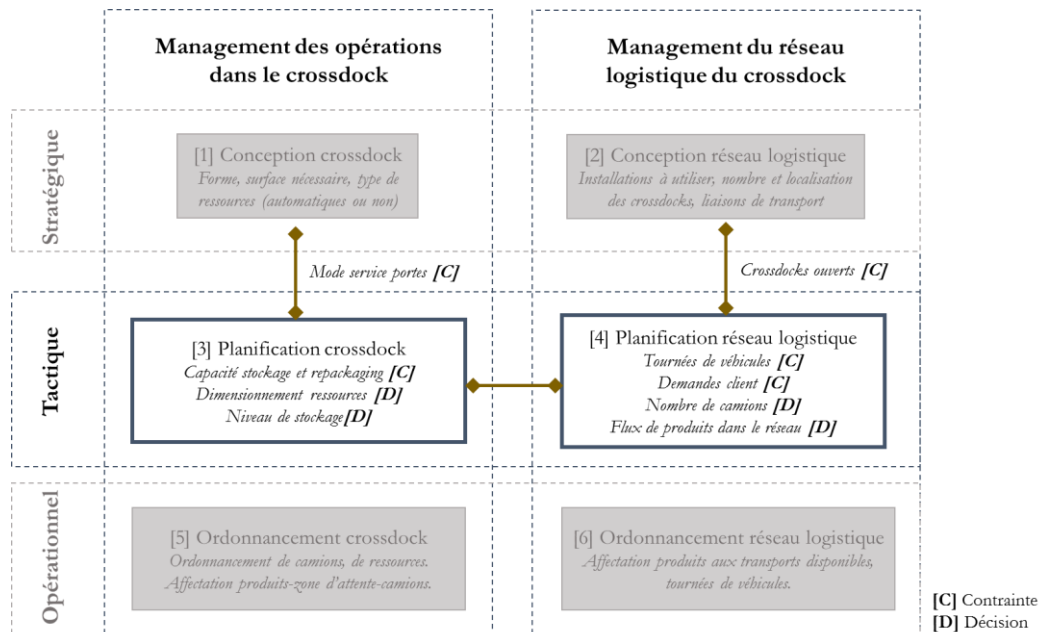


Figure 20. Caractérisation de la problématique # 1 traitée dans cette thèse

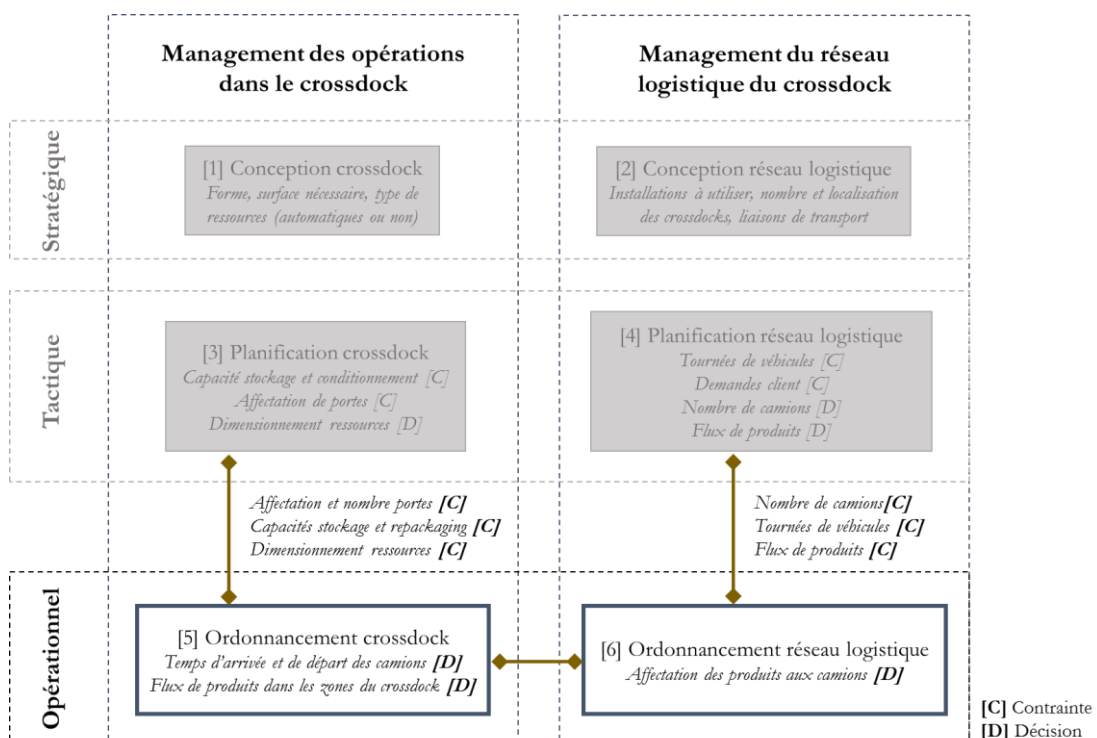


Figure 21. Caractérisation de la problématique # 2 traitée dans cette thèse

En résumant, notre problématique est focalisée sur la planification et l'ordonnement du centre de crossdock, mais elle intègre également des décisions et des contraintes du réseau logistique associé. Pour traiter cette problématique, nous proposons une approche par étape : d'abord, une optimisation au niveau tactique, focalisée sur le réseau logistique mais intégrant des contraintes internes du crossdock ; puis une optimisation opérationnelle, prenant en compte les résultats obtenus à la première étape. Même si elle procède par décomposition, cette approche permet de prendre en compte des interactions entre les décisions tactiques et opérationnelles. Et cela est très important, selon Dauzère-Pérès & Lasserre (2002), les interdépendances entre les différents niveaux décisionnels n'ont pas reçu assez d'attention, malgré l'impact que cela peut représenter sur le résultat global.

### 3.6. Planification des flux dans un centre de crossdock

Les travaux de recherche présentés par la suite considèrent un réseau logistique qui comporte un ensemble de points de demande, un ensemble de points d'approvisionnement et un ou plusieurs centres de crossdock. Les décisions sont associées à la définition des flux de produits entre les nœuds du réseau et l'utilisation des installations, avec l'objectif de minimiser le coût logistique. Nous identifions deux problématiques associées : le design du réseau logistique et le transbordement. Les articles analysés sont classés par catégorie dans le Tableau 12 et le Tableau 13, sur la base de ce qui a été décrit dans la section précédente.

Les travaux traitant le design du réseau logistique sont présentés ci-dessous. Nous y retrouvons une partie de la problématique associée aux plateformes AILN, notamment une vue complète du réseau logistique, avec la prise en compte du transport amont (fournisseurs vers les centres de crossdock), du passage des produits par le ou les centres de crossdocks et du transport aval (centres de crossdock vers les clients). Tous les modèles incluent une minimisation des coûts de transport, ce qui est aussi un objectif du processus de planification dans les AILN. En revanche, étant donné que la problématique de design reste plutôt liée aux décisions stratégiques, elle ne répond pas totalement aux caractéristiques de notre cas industriel, notamment sur trois points : (1) la plupart des approches restent statiques, ne considérant pas plusieurs périodes de temps. (2) Les coûts de transport sont très souvent définis de façon unitaire par produit transporté (nous étudions une caractérisation plutôt liée au nombre de camions). (3) Les coûts de traitement de produits ne sont pas inclus et les approches visent plutôt à minimiser les coûts d'ouverture des centres de crossdock (dans notre cas les AILN sont déjà en place).

Jayaraman & Ross (2003) considèrent un réseau logistique avec un seul fournisseur, plusieurs points intermédiaires (entrepôts et crossdocks) et des détaillants demandeurs de plusieurs types de produits. L'étude se base sur la situation industrielle de Walgreens (magasin grande distribution) et proposent deux approches de modélisation (design et transbordement). Le modèle pour le design du réseau logistique inclut des décisions liées aux flux des produits et

à l'ouverture des points intermédiaires. L'objectif est de minimiser les coûts d'ouverture et de transport. Une heuristique de recuit simulé est développée et les expérimentations sont faites sur des instances basées sur des données industrielles. Le travail de recherche de Jayaraman & Ross (2003) est poursuivi par Ross & Jayaraman (2008), qui proposent deux approches méta-heuristiques qui sont testées sur les mêmes instances, fournissant des meilleures solutions pour une bonne partie d'entre elles.

Sung & Song (2003) proposent une approche heuristique basée sur l'algorithme de recherche tabou pour minimiser le coût total dans un réseau logistique avec plusieurs crossdocks. Des coûts d'ouverture et de transport (nombre de véhicules) sont considérés. Les flux directs sont autorisés. Des contraintes fortes sur les temps de ramasse (chez les fournisseurs) et des livraisons (chez les clients) sont incluses. Ce travail est enrichi par Sung & Yang (2008), qui proposent un algorithme basé sur la méthode *branch-and-price* pour résoudre le même problème. En intégrant des hypothèses similaires à celles de deux travaux décrits précédemment, Bachlaus et al. (2008) proposent une formulation mathématique pour la planification des flux de production et distribution dans un réseau logistique avec deux centres de crossdock. L'objectif est la minimisation du coût total, qui inclut des coûts d'achat de la matière première, du transport, de l'ouverture des nœuds intermédiaires et du traitement des produits dans ces centres. Les auteurs développent une méta-heuristique basée sur l'algorithme d'optimisation par essais particuliers.

Kellar et al. (2015) proposent une optimisation du réseau logistique en étudiant la taille des lots de produits à transporter et la synchronisation entre les flux amont et aval dans les nœuds intermédiaires. Un modèle en programmation non-linéaire et une heuristique sont proposés pour minimiser le coût de transport et le coût de stockage. Une des décisions principales consiste à définir le rôle des points intermédiaires : ils peuvent fonctionner comme des crossdocks ou comme des entrepôts classiques. Les expérimentations sont basées sur des cas d'études dans l'industrie automobile (distribution de véhicules) et dans l'industrie de l'électroménager. Un modèle en programmation non-linéaire est également développé par Hasani Goodarzi & Zegordi (2016) afin de déterminer les localisations des centres de crossdocks et les flux de transport dans un réseau logistique. Les flux directs entre les fournisseurs et les clients sont considérés. Les tournées de collectage sont envisagées pour les fournisseurs, avec des distances maximales à parcourir. Une approche méta-heuristique est développée pour minimiser le coût total qui comporte : les coûts de traitement des produits dans les crossdocks, le coût du transport (fixe par camion, variable par produit) et le coût d'ouverture des crossdocks.

Finalement, une approche combinée de simulation et d'optimisation est proposée par Martins et al. (2017) pour minimiser les coûts d'un réseau logistique dans l'industrie pharmaceutique. Les flux entre les nœuds intermédiaires (entrepôts et crossdocks) sont possibles, contrairement aux flux directs entre fournisseurs et clients. Des capacités de

traitement et de stockage sont considérées. Les routes entre les nœuds du réseau sont restreintes sur la base d'un seuil minimum de produits à transporter. Un modèle en programmation linéaire en nombres entiers est développé qui vise à minimiser les coûts d'ouverture, de stockage, de traitement et du transport. Suite à cette optimisation stratégique-tactique, une approche de simulation à événements discrets est utilisée pour évaluer les impacts au niveau opérationnel.

Les articles abordant la problématique du transbordement de produits dans un réseau logistique sont présentés par la suite. Nous y retrouvons également une partie des caractéristiques du fonctionnement des AILN : les flux de produits entre les fournisseurs, les crossdocks (souvent déjà installés) et les clients sont définis pour un horizon avec plusieurs périodes de temps. Le coût de transport est plus fréquemment associé au nombre de camions, mais peu d'approches définissent leur capacité de manière dimensionnelle (c'est le cas dans les AILN). En interne, des coûts et des capacités sont inclus, notamment sur le stockage et traitement de produits. En revanche, le dimensionnement des ressources (comme dans les AILN) n'est pas modélisé de manière directe et l'activité de repackaging n'est pas décrite dans aucun des articles analysés.

Ratliff et al. (1999) étudient le design d'un réseau logistique avec des crossdocks axés sur le remplissage (les camions ne partent pas tant qu'un seuil de remplissage n'est pas atteint). Ils présentent un cas d'étude sur le réseau de distribution de véhicules Ford. Les flux directs entre les fournisseurs et les clients sont autorisés. La demande de produits est caractérisée par des couples *origine-destination*. Un modèle en programmation linéaire en nombres mixtes est proposé pour minimiser le temps de livraison des produits, grâce à l'allocation des flux et les décisions d'ouverture des crossdocks. En intégrant des hypothèses similaires à celles des travaux de Ratliff et al. (1999), un algorithme de colonies de fourmis est proposé par Musa et al. (2010) visant à minimiser le coût total du transport, qui comporte les camions directs entre les fournisseurs et les clients, ainsi que les camions utilisés pour faire un passage par les crossdocks. Hosseini et al. (2014) se basent sur les mêmes hypothèses que Musa et al. (2010), mais rajoutent la possibilité de faire des tournées chez les fournisseurs pour livrer directement les clients. Ces tournées sont restreintes à 3 fournisseurs maximum. Un modèle en programmation linéaire en nombres mixtes est proposé, ainsi qu'une méta-heuristique basée sur le recuit simulé et la recherche d'harmonie. L'objectif est de minimiser le coût total du transport.

Gümüş & Bookbinder (2004) étudient un réseau logistique avec plusieurs centres de crossdocks, auxquels l'on associe des coûts d'ouverture et des coûts de stockage. Les flux directs sont permis. Le transport est caractérisé par un coût fixe (par camion) et un coût variable (lié au temps de parcours). Une modélisation en programmation linéaire en nombres mixtes est proposée pour minimiser le coût total (transport ouverture des crossdock et stockage). Les travaux de Ma et al. (2011) étudient un réseau logistique avec des caractéristiques similaires à



celles décrites par Gümüş & Bookbinder (2004), en rajoutant des contraintes fortes sur les temps de livraison (depuis les fournisseurs) et sur les temps de réception (chez les clients). Une heuristique basée sur les algorithmes génétiques est proposée pour minimiser le coût total (transport et stockage). Le coût de transport est divisé en une partie variable (lié au temps de parcours) et une partie fixe (par camion).

À la différence des travaux décrits précédemment, dans les articles présentés par la suite les flux directs de produits entre les fournisseurs et les clients ne sont pas autorisés.

Ganeshan (1999) considère un réseau logistique dans la grande distribution, avec un seul nœud intermédiaire entre les fournisseurs et les clients, avec des capacités de stockage et de traitement illimitées. Cet entrepôt reçoit les demandes des clients et est en charge de passer les commandes auprès des fournisseurs, sur la base d'un niveau de stock minimal. Les demandes des clients sont considérées stochastiques, le coût de transport est donné par produit transporté et un coût de traitement est associé à l'entrepôt. L'objectif du modèle est de minimiser le coût logistique (transport et stockage). Avec des hypothèses similaires, Miao et al. (2009) proposent une heuristique basée sur un algorithme génétique combiné avec une affectation probabiliste pour minimiser le coût total dans le réseau logistique (transport, stockage et rupture de stock). Le transport est caractérisé par des routes prédéfinies entre les différents acteurs, avec des fenêtres de temps qui doivent être respectées.

Les travaux de Marjani et al. (2011) et Javanmard et al. (2014) considèrent également une capacité de stockage. En revanche, la capacité de traitement est considérée comme étant limitée. Marjani et al. (2011) proposent un modèle en programmation linéaire en nombres entiers et trois heuristiques pour traiter la planification d'un réseau logistique avec plusieurs crossdocks. Les flux entre crossdocks sont possibles. Les auteurs considèrent des fenêtres de temps associées aux livraisons depuis les fournisseurs et aux livraisons chez les clients. Deux objectifs sont étudiés : (1) minimisation du coût total (transport et traitement) et (2) minimisation du délai (par rapport aux fenêtres de temps). Javanmard et al. (2014) étudient un réseau logistique avec crossdocking dans l'industrie avicole. Un modèle en programmation linéaire en nombres mixtes est proposé pour minimiser les coûts de transport (par unité transportée) et de stockage. Une approche méta-heuristique est également développée. Les expérimentations sont réalisées à partir des données d'un cas d'étude.

Comme évoqué dans l'analyse des travaux sur le design du réseau logistique, Jayaraman & Ross (2003) et Ross & Jayaraman (2008) proposent deux approches de modélisation (design et transbordement) dans un réseau logistique avec plusieurs points intermédiaires (entrepôts crossdocks). Le modèle du transbordement qui vise à minimiser les coûts de transport, intègre une partie des résultats du modèle du design, notamment l'affectation des routes entre le fournisseur, les crossdock, les entrepôts et les clients. De plus, la contrainte sur la capacité de

traitement dans les crossdocks est relaxée car elle est incluse dans le modèle du design. Des méthodes heuristiques et méta-heuristiques sont développées pour la résolution du modèle.

Chen et al. (2006) étudient un réseau logistique qui comporte plusieurs centres de crossdock. La capacité d'approvisionnement et les temps de ramassage sont connus et considérés comme des contraintes fortes. Pour chaque crossdock, la capacité de stockage est connue, ainsi que le coût associé. Le transport est évalué par rapport à la distance entre les nœuds. Plusieurs heuristiques sont développées, l'objectif étant de minimiser les coûts de transport et de stockage. Miao et al. (2012) proposent deux méta-heuristiques basées sur des méthodes adaptatives appliquées à la recherche tabou et aux algorithmes génétiques. L'objectif des modèles est de minimiser le coût total, réparti ainsi : le transport, le stockage dans les crossdocks, de rupture de stock chez le client et les pénalités générées par le non-respect des temps de livraison. Dans le réseau logistique, le transport est caractérisé par des routes prédéfinies entre les différents acteurs du réseau, avec des ramasses et des livraisons mono-passage. Finalement, Alptekinoglu & Tang (2005) étudient le problème de transbordement dans un réseau logistique mono-produit, avec une demande considérée stochastique. Les crossdocks ont une capacité maximale de traitement par période et le stockage n'est pas autorisé. Il s'agit du seul article analysé appliquant une politique de stockage zéro. Chaque crossdock est approvisionné depuis un seul fournisseur, mais peut servir plusieurs détaillants. Des coûts linéaires par unité sont considérés pour le transport, le traitement des produits et la rupture de stock.

Sur la base de notre proposition pour traiter la problématique de planification dans les AILN et de la configuration du crossdock associé, une comparaison détaillée avec cette revue de littérature sera présentée dans la Partie II du manuscrit.

## I. Cadre de recherche et problématique

Article	Probl.	Demande	Données réelles (industrie)	Nombre de crossdocks (niveaux intermédiaires)	Restriction routes transport	Flux directs	Repackaging	Flux de produits	Type de produits (emballage)	Stockage	Capacité traitement	Fenêtres de temps	Capacité camions	Inducteurs de coût	Méthodes de résolution
Ratliff et al. (1999)	Transb.	Déterm.	N (Automobile)	10 à 15 (>1)	N	O	N	Orig.-dest.	Mono (Equiv.)	ND	I	ND	Nb max.	Stockage/traitement	PLNM
Ganeshan (1999)	Transb.	Stochas.	O (Grande distribution)	1 (1)	N	N	N	Agrégé	Mono (Equiv.)	I	I	ND	ND	Coût par unité transportée, Stockage/traitement	Modèle stockage (s,Q) Simulation
Jayaraman & Ross (2003)	Design	Déterm.	O (Grande distribution)	10 à 20 (>1)	N	N	N	Agrégé	Multi (ND)	ND	L	ND	ND	Coût par unité transportée, ouverture	Heuristique
	Transb.	Déterm.	O (Grande distribution)	10 à 20 (>1)	O	N	N	Agrégé	Multi (ND)	ND	I	ND	ND	Coût par unité transportée	Heuristique
Sung & Song (2003)	Design	Déterm.	N (ND)	3 à 12 (1)	O	O	N	Orig.-dest.	ND (Equiv.)	ND	I	Fortes	Nb max.	Ouverture installations, nombre de camions	Programmation mathématique heuristique
Gümüş & Bookbinder (2004)	Transb.	Déterm.	N (ND)	1 à 6 (1)	N	O	N	Agrégé	Multi (Equiv.)	I	I	ND	ND	Ouverture installations, nombre de camions, stockage/traitement	PLNM
Alptekinoğlu & Tang (2005)	Transb.	Stochas.	N (ND)	2 (1)	O	O	N	Agrégé	Mono (ND)	Z	L	ND	ND	Coût par unité transportée, stockage/traitement, pénalité (rupture stock)	Formulation mathématique
Chen et al. (2006)	Transb.	Déterm.	N (ND)	4 à 18 (1)	N	N	N	Agrégé	Multi (ND)	L	I	Fortes	ND	Distance parcourue, stockage/traitement	PLNE, heuristiques
Sung & Yang (2008)	Design	Déterm.	N (ND)	3 à 12 (1)	O	O	N	Orig.-dest.	ND (Equiv.)	ND	I	Fortes	Nb max.	Ouverture, nombre de camions	Branch-and-price
Ross & Jayaraman (2008)	Design	Déterm.	O (Grande distribution)	10 à 20 (>1)	N	N	N	Agrégé	Multi (ND)	ND	L	ND	ND	Coût par unité transportée, ouverture	Méta-heuristiques
	Transb.	Déterm.	O (Grande distribution)	10 à 20 (>1)	O	N	N	Agrégé	Multi (ND)	ND	I	ND	ND	Coût par unité transportée	Méta-heuristiques

Probl. : problématique / Trans. : transbordement / N : non / O : oui / Orig.-dest. : origine-destination / Equiv. : équivalent / I : illimité(e) / L : limité(e) / Z : zéro / Nb. Max. : nombre maximal / ND : non défini

Tableau 12. Caractérisation des articles analysés (1999 à 2008) traitant la planification des flux dans un réseau logistique avec des centres de crossdock

Article	Prob.	Demande	Données réelles (industrie)	Nombre de crossdocks (niveaux intermédiaires)	Restriction routes transport	Flux directs	Repackaging	Flux de produits	Type de produits (emballages)	Stockage	Capacité traitement	Fenêtres de temps	Capacité camions	Inducteurs de coût	Méthodes de résolution
Bachlaus et al. (2008)	Design	Déterm.	N (ND)	2 à 15 (>1)	N	N	N	Agrégé	Multi (ND)	ND	L	ND	ND	Achat, coût par unité transportée, ouverture, stockage/traitement	Méta-heuristique
Miao et al. (2009)	Transb.	Déterm.	N (ND)	4 à 8 (1)	O	N	N	Agrégé	Mono (NA)	I	I	Fortes	ND	Coût par unité transportée, stockage/traitement, pénalité (rupture stock)	PLNE, heuristique
Musa et al. (2010)	Transb.	Déterm.	N (ND)	3 à 50 (1)	N	O	N	Orig.-dest.	Multi (Div.)	ND	I	ND	Dim.	Nombre de camions	Heuristique
Marjani et al. (2011)	Transb.	Déterm.	N (ND)	2 à 5 (>1)	N	N	N	Agrégé	Multi (NA)	I	L	Souples (am.) Fortes (av.)	ND	Coût par unité transportée, stockage/traitement, pénalités (stock/fenêtres)	PLNE, heuristique
Ma et al. (2011)	Transb.	Déterm.	N (ND)	3 à 6 (1)	N	O	N	Agrégé	Multi (Equiv.)	I	I	Fortes	Nb max.	Nombre de camions, stockage/traitement	Heuristique
Miao et al. (2012)	Transb.	Déterm.	N (ND)	4 à 10 (1)	O	N	N	Agrégé	Mono (Equiv.)	L	I	Souples (am.) Fortes (av.)	Nb max.	Coût par unité transportée, stockage/traitement, pénalités (stock/fenêtres)	PLNE, méta-heuristique
Hosseini et al. (2014)	Transb.	Déterm.	N (ND)	3 à 50 (1)	N	O	N	Orig.-dest.	Multi (Div.)	ND	I	ND	Dim.	Nombre de camions	PLNE, méta-heuristique
Javanmard et al. (2014)	Transb.	Déterm.	N (ND)	1 à 2 (1)	N	N	N	Agrégé	Multi (NA)	I	L	ND	ND	Coût par unité transportée, stockage/traitement	PLNE, méta-heuristique
Kellar et al. (2015)	Design	Déterm.	O (Automobile et électroménager)	6 à 72 (1)	O	O	N	Agrégé	Multi (NA)	ND	I	ND	ND	Coût par unité transportée, stockage/traitement	PNM (non-linéaire), heuristique
Hasani Goodarzi & Zegordi (2016)	Design	Déterm.	N (ND)	1 à 8 (>1)	O	O	N	Agrégé	Mono (Equiv.)	ND	L	ND	Nb max.	Coût par unité transportée, nombre de camions, ouverture, stockage/traitement	PNM (non-linéaire), méta-heuristique
Martins et al. (2017)	Design	Déterm.	O (Pharmaceutique)	1 à 4 (>1)	O	N	N	Agrégé	Multi (Div.)	L	L	ND	Dim.	Coût par unité transportée, nombre de camions, ouverture, stockage/traitement	PLNE, simulation

Probl. : problématique / Trans. : transbordement / N : non / O : oui / Orig.-dest. : origine-destination / Equiv. : équivalent / I : illimité(e) / L : limité(e) / Z : zéro / Nb. Max. : nombre maximal / ND : non défini

Tableau 13. Caractérisation des articles analysés (2008 à 2017) traitant la planification des flux dans un réseau logistique avec des centres de crossdock

### 3.7. Ordonnancement des activités dans le centre du crossdock.

Nous allons commencer par le problème de séquençement de camions, pour ensuite aborder l'ordonnancement des camions. Pour rappel, les décisions du séquençement concernent principalement *l'ordre* de traitement des camions dans les quais de chargement/déchargement. Dans l'ordonnancement, l'on cherche à définir les temps d'arrivée et de départ des camions (*quand*). Les articles sont classifiés et caractérisés dans le Tableau 14 et le Tableau 15, sur la base de ce qui a été décrit sur le mode opératoire et les inducteurs de coûts pour un centre de crossdock.

Ces travaux répondent en partie à la problématique industrielle que nous traitons avec les plateformes AILN : des environnements multi-portes et multi-produits y sont étudiés (comme dans les AILN). Des capacités de traitement et de stockage sont également définies, mais souvent elles sont considérées illimitées (sauf pour certains cas d'études dans l'industrie agroalimentaire où une politique de stockage zéro est considérée). Ces hypothèses sur les capacités ne sont pas applicables dans les AILN, car le stockage et les ressources pour traiter les produits y sont limités. Concernant la capacité des camions, dans la plupart des articles elle n'est pas directement définie, car les contenus des camions sont donnés comme des paramètres d'entrée. Dans notre cas d'étude, nous travaillons dans un premier temps avec une capacité dimensionnelle (prise en compte dans un des articles analysés), mais nous avons la perspective de travailler avec des contenus prédéfinis (à l'instar des AILN Nissan). Cela sera décrit dans la Partie IV du manuscrit.

Finalement, en termes d'inducteurs de coûts, la minimisation du temps total d'opération (*makespan*) est le plus considéré, avec d'autres objectifs comme la minimisation du stockage et la minimisation de l'écart entre des temps de départ (ou arrivée) des camions fixés et les temps planifiés par le modèle. Dans notre étude, la minimisation du *makespan* n'est pas un objectif en soi, mais sera plutôt traité comme une contrainte : tous les camions (conteneurs) doivent être partis à la fin de l'horizon de planification. Nous nous intéressons à la minimisation de l'écart entre des temps d'arrivée prédéfinis et les temps planifiés (sur le transport amont notamment, étant donné que le plan transport est prédéfini par Renault).

Pour démarrer l'analyse des articles, nous présentons ci-dessous les travaux traitant le séquençement de camions.

Li et al. (2004) se basent sur le problème d'ordonnancement de machines pour modéliser les activités dans un atelier d'un centre de crossdock plusieurs portes de (dé)chargement. Deux activités principales y sont définies : la *décomposition* des camions en entrée et l'*assemblage* des camions en sortie. En conséquence, le stockage temporaire n'est pas autorisé. Pour chaque *tâche* (camions), l'on connaît la date de début, le temps de traitement et la date de fin. Pour les camions en sortie, l'information des *sources* (camions en entrée) nécessaires pour l'assemblage est donnée.

Le problème est formulé à l'aide d'un modèle en programmation en nombres entiers, où l'objectif est de minimiser le coût des pénalités liées à l'avance ou au retard pris sur les dates de fin prévues. Deux heuristiques basées sur des algorithmes génétiques sont développées. Le modèle en programmation linéaire en nombres mixtes proposé par Maknoon & Baptiste (2010) intègre également des contraintes sur les temps de départ des camions. L'objectif est de maximiser le nombre de produits qui sont directement transférés vers l'expédition, immédiatement après leur déchargement (par extension, ceci va minimiser le niveau de stock temporaire). Les séquences d'arrivée et de départ des camions sont connues. Six scénarios sont considérés par rapport à cette information, allant du moins restrictif (tous les camions sont disponibles au début de l'horizon et les séquences sont à définir par le modèle), au plus restrictif (les séquences doivent être respectées). Fazel Zarandi et al. (2014) considèrent un centre de crossdock automatisé, où le stockage n'est pas permis et l'interruption du chargement des camions est autorisée. Des temps de départs prédéfinis pour les camions en sortie du crossdock sont considérés. Une approche multicritère est proposée, avec des modèles en programmation par contraintes, en programmation en nombre entiers et une heuristique basée sur les algorithmes génétiques.

À la différence des trois travaux présentés précédemment, les articles analysés par la suite n'incluent pas des contraintes sur les temps de départ des camions et considèrent que tous les camions sont disponibles au début de l'horizon de planification (temps d'arrivée *concentrés*). Comme Li et al. (2004), Chen & Lee (2009) modélisent l'opération du centre de crossdock comme un ordonnancement de machines à deux étapes : le déchargement et le chargement de camions. En revanche, Chen & Lee (2009) considèrent une capacité de traitement illimitée et un crossdock avec une porte de déchargement et une porte de chargement. Les produits sont pré-affectés aux camions en sortie du crossdock. Des algorithmes heuristiques basés sur les approches *error-bound* et *branch-and-bound* sont développés avec l'objectif de minimiser la durée totale de l'opération (*makespan*).

Yu & Egbelu (2008) considèrent un centre de crossdock automatisé, avec un quai de déchargement et un quai de chargement. Une zone de stockage temporaire limitée est considérée. Les contenus des camions en entrée sont connus, tout comme la liste de produits à charger dans les camions en sortie. Sur la base des temps de déchargement/chargement des camions et des temps de déplacement des produits entre la réception et l'expédition, l'objectif est de minimiser le temps total d'opération (*makespan*). Trois approches de modélisation y sont proposées : un modèle en programmation linéaire en nombres entiers, une énumération complète et une heuristique. Plusieurs articles enrichissent les travaux de recherche de Yu & Egbelu (2008) : Vahdani & Zandieh (2010) proposent 5 méta-heuristiques qui fournissent des meilleures solutions. Une approche basée sur la méthode *GRASP* est développée par Ghobadian et al. (2012). Mohtashami (2015) propose une approche basée sur les algorithmes

génétiques et les résultats des expérimentations montrent que les heuristiques proposées par les auteurs fournissent des solutions au moins de la même qualité.

Alpan et al. (2011) considèrent un centre de crossdock dans lequel l'interruption du chargement des camions est autorisée pour privilégier des flux directs entre la zone de réception et celle d'expédition. Plusieurs portes sont disponibles pour les activités de déchargement et de chargement. Trois heuristiques basées sur une approche de programmation dynamique sont développées. D'autres hypothèses importantes sont : les produits sont conditionnés dans le même type d'emballage, la capacité des camions est donnée en nombre de produits et le stockage temporaire a une capacité illimitée. L'objectif est de minimiser les coûts de stockage et des pénalités liées à l'interruption du chargement de camions en départ. Une configuration similaire est étudiée par Larbi et al. (2011), avec une différence : il y a une seule porte de déchargement et une seule porte de chargement. Trois scénarios différents sur l'arrivée de camions sont étudiés : le premier considère que la séquence et les contenus des camions sont totalement connus. Dans le deuxième scénario, ces données sont partiellement connues. Finalement, l'on considère qu'aucune information n'est disponible sur la séquence d'arrivée, et les contenus seront appris lors de la réception du camion.

Toujours sur un environnement mono-porte (1 porte de chargement et 1 porte de déchargement), Sadykov (2012) développe un algorithme polynomial basée sur la programmation dynamique pour définir la séquence de camions en arrivée et au départ du centre de crossdock, avec l'objectif de minimiser le stockage intermédiaire. Keshtzari et al. (2016) proposent un modèle en programmation linéaire en nombres mixtes et une méta-heuristique sont proposés pour minimiser la durée totale de l'opération (*makespan*). Le stockage intermédiaire n'est pas autorisé. Plusieurs types de produits sont considérés et les contenus des camions en départ sont donnés en accord (quantité par type de produit). Maknoon et al. (2017) proposent un modèle en programmation linéaire en nombre mixtes et une heuristique pour maximiser le nombre de produits qui passent du déchargement au chargement, sans passer par la zone de stockage intermédiaire. Ceci équivaut à minimiser le stockage dans le centre de crossdock. La destination des produits est connue dès le déchargement et comme l'on considère un seul type de produit, la capacité des camions est définie par un nombre maximal de produits à charger.

Les articles se focalisant sur l'ordonnement de camions sont présentés ci-dessous.

Boloori Arabani et al. (2011) enrichissent le modèle PLNE proposé par Yu & Egbelu (2008) avec un ensemble de variables pour discrétiser l'horizon de planification. La problématique traitée passe donc du séquençement de camions à l'ordonnement de camions. Des fenêtres de temps sur les temps de départ des camions sont incluses. Cinq algorithmes méta-heuristiques sont proposés et testés sur des instances de différentes tailles. Une modèle de programmation en nombres entiers et deux heuristiques sont proposées par Ladier & Alpan (2014). Des fenêtres

des temps sont considérées en entrée et en sortie de la plateforme. Des pénalités sont associées au non-respect de ces temps d'arrivée/départ. Une zone de stockage avec capacité illimitée est considérée. Le départ d'un camion ne s'effectue que s'il est totalement rempli (la capacité est donnée en nombre de produits). Le modèle vise à minimiser les coûts de stockage et les coûts des pénalités liées aux fenêtres de temps. En intégrant également des fenêtres de temps, cette fois-ci sur l'arrivée et le départ des camions en entrée, Berghman et al. (2012) considèrent un centre de crossdock avec plusieurs portes, qui peuvent servir pour le chargement ou pour le déchargement des camions. Les produits déchargés sont pré-affectés aux camions en sortie. Une zone de stockage temporaire est considérée si le camion correspondant n'est pas dans un quai de chargement. Une approche d'ordonnancement des machines parallèles est utilisée pour la modélisation, qui a comme objectif de minimiser le temps de séjour des produits.

Les travaux proposés par Alvarez-Perez et al. (2008) et Bellanger et al. (2013) proposent des modélisations basées sur l'ordonnancement des machines. Dans Alvarez-Perez et al. (2008) l'atelier est divisé en deux zones et deux opérations : la zone de réception avec décomposition de camions et la zone d'expédition avec l'assemblage de camions. L'on considère des pénalités liées aux temps de départ prédéfinies pour les expéditions. Les capacités de stockage et de ressources sont considérées illimitées et deux méthodes heuristiques sont proposées pour minimiser les pénalités. Bellanger et al. (2013) modélisent trois opérations dans l'atelier du crossdock : le déchargement de camions, le tri de produits et le chargement de camions. Dans chacune de ces zones, plusieurs machines parallèles sont considérées : des portes d'arrivée, des ateliers de tri et des portes de départ. Le stockage intermédiaire n'est pas autorisé. Trois heuristiques et une méthode *branch-and-bound* sont développés avec l'objectif de minimiser la durée totale de l'opération (*makespan*).

Boysen et al. (2008) étudient un centre de crossdock avec un quai de déchargement et un quai de chargement, avec une zone de stockage intermédiaire dans l'atelier. L'on considère que tous les camions arrivant au crossdock sont disponibles au début de l'horizon de planification et que les activités de déchargement, tri et mise en zone de chargement se font sur la même période de temps. Pour la modélisation, les auteurs utilisent la programmation dynamique, qui sert de base au développement d'une heuristique. Boysen (2010) étudie un crossdock dans l'industrie agroalimentaire. En raison des contraintes liées aux produits périssables, le stockage n'est pas autorisé. Il est considéré que tous les produits sont conditionnés dans le même type d'emballage et la capacité des camions est définie en accord. La politique de zéro inventaire oblige qu'au moment de l'arrivée d'un camion, les camions en départ qui vont être servis avec ces produits soient appelés à une des portes de chargement. Trois objectifs liés à la réduction du délai de distribution sont proposés par l'auteur : (1) temps total de travail, (2), temps de chargement et (3) écart sur les temps (prédéfinis) de départ. Une modélisation à l'aide de la programmation dynamique et une heuristique basée sur le recuit simulé y sont développées.



Également avec une politique de zéro stockage, Bolori Arabani, Zandieh, et al. (2011) proposent une modélisation bi-objectif basée sur des algorithmes génétiques, pour minimiser la durée totale d'opération (*makespan*) et l'écart entre les temps de départ des camions et des temps préétablis pour l'expédition. Il s'agit d'un crossdock avec des tapis roulant pour transporter les produits. Une opération de repackaging est considérée : la déconsolidation de palettes et reconsolidation par destination. Les contenus des camions sont connus (par type de produit).

Un modèle en programmation linéaire en nombres entiers est proposé par Carrera et al. (2008). Ce travail se base sur un cas d'étude d'un centre de crossdock dans l'industrie de la chaussure. Le stockage temporaire est autorisé, avec une capacité limitée. La charge de travail est évaluée en faisant une comparaison avec une charge idéale. Plusieurs types de produits sont considérés, avec des emballages qui peuvent varier entre eux. Le volume ( $m^3$ ) et le poids sont connus, les capacités des camions en départ sont données en accord. L'objectif du modèle est de minimiser le coût total qui comporte le coût de stockage, le coût des pénalités associées aux fenêtres de temps et le coût du non lissage de la charge. Un autre cas industriel est présenté par Fanti et al. (2016), sur une compagnie italienne dans la grande distribution. Les auteurs étudient un centre de crossdock où les camions en entrée contiennent des palettes dans lesquelles l'on retrouve plusieurs emballages du même type de produit. Dans l'atelier, les palettes sont déconsolidées et les produits triés par destination, avant d'être regroupés à nouveau dans des palettes avec plusieurs types de produits. Deux modèles en programmation linéaire en nombres entiers sont développés, ainsi qu'un algorithme heuristique.

Sur la base de notre proposition pour traiter la problématique d'ordonnancement dans les AILN et de la configuration du crossdock associé, une comparaison détaillée avec cette revue de littérature sera présentée dans la Partie III du document.

Article	Problème	Données réelles (industrie)	Portes amont/aval	Mode service	Repackaging.	Interruption	Stockage	Capacité traitement	Type de produits (emballages)	Affectation de produits (interch.)	Capacité camions	Temps d'arrivée	Temps de départ	Inducteurs de coût	Méthodes de résolution
Li et al. (2004)	Séquence.	N (ND)	>1/ >1	Excl.	N	N	Z	L	ND (ND)	Pré-D (N)	ND	Par camion	O	Temps arrivé départ	Ordonnancement de machines, heuristiques, PLNE
Yu & Egbelu (2008)	Séquence.	N (ND)	1/1	Excl.	N	N	I	I	Multi (ND)	Post-D (O)	ND	Concentré	N	Makespan	PLNE, Enumération complète, Heuristique
Carrera et al. (2008)	Ordo.	O (Chaussure)	NA	ND	N	N	L	L	Multi (Div.)	Pré-D (N)	Dim.	Par camion	O	Stockage, lissage charge, temps arrivée/départ	PLNM
Boysen et al. (2008)	Ordo.	N (ND)	1/1	Excl.	N	N	I	I	Multi (Equiv.)	Post-D (O)	ND	Concentré	N	Makespan	Programmation dynamique, Heuristique
Alvarez-Perez et al. (2008)	Ordo.	N (ND)	>1/ >1	ND	N	N	I	I	ND (ND)	Pré-D (N)	ND	Par camion	O	Temps arrivé départ	Ordonnancement de machines, méta-heuristiques
Chen & Lee (2009)	Séquence.	N (ND)	1/1	Excl.	N	N	Z	I	ND (ND)	Pré-D (N)	ND	Concentré	N	Makespan	Ordonnancement de machines, heuristiques
Boysen (2010)	Ordo.	N (Agroalimentaire)	>1/ >1	Excl.	N	N	Z	I	Multi (Equiv.)	Pré-D (N)	ND	Concentré	O	Stockage, temps (dé)chargement, temps arrivée/départ	Programmation dynamique, Heuristique
Maknoon & Baptiste (2010)	Séquence.	N (ND)	>1/ >1	Excl.	N	N	I	I	Mono (Equiv.)	Dest. (O)	Nb max.	Par camion	O	Stockage	PLNM
Vahdani & Zandieh (2010)	Séquence.	N (ND)	1/1	Excl.	N	N	I	I	Multi (Div.)	Post-D (O)	ND	Concentré	N	Makespan	Méta-heuristiques
Alpan et al (2011)	Séquence.	N (ND)	>1/ >1	Excl.	N	O	I	I	Multi (Equiv.)	Dest. (O)	Nb max.	Concentré	N	Stockage, interruption	Programmation dynamique, Heuristique
Boloori Arabani, Zandieh, et al. (2011)	Ordo.	N (ND)	1/1	Excl.	O	N	Z	I	Multi (ND)	Post-D (O)	ND	Concentré	O	Makespan, temps arrivée/départ	Heuristiques

Séquence. : séquençement / Ordo. : ordonnancement / Excl. : exclusif / Comb. : combiné / N : non / O : oui / I : illimité(e) / L : limité(e) / Z : zéro / Div. : diversifié / Equiv. : équivalent / Interch. : interchangeabilité / D : distribution / Dest. : destination / Dim. : dimensionnelle

Tableau 14. Caractérisation des articles analysés (2004 à 2011) traitant l'ordonnancement des activités dans un centre de crossdock

## I. Cadre de recherche et problématique

Article	Problème	Données réelles (industrie)	Portes amont/aval	Mode service	Repackaging.	Interruption	Stockage	Capacité traitement	Type de produits (emballages)	Affectation de produits (interch.)	Capacité camions	Temps d'arrivée	Temps de départ	Inducteurs de coût	Méthodes de résolution
Boloori Arabani et al. (2011)	Ordo.	N (ND)	1/1	Excl.	N	N	I	I	Multi (ND)	Post-D (O)	ND	Concentré	N	Makespan, lissage de charge	PLNE, méta-heuristiques
Larbi et al. (2011)	Séquence.	N (ND)	1/1	Excl.	N	O	I	I	Multi (Equiv.)	Dest. (O)	Nb max.	Concentré	N	Stockage, interruption	Algorithme polynomial, heuristique
Ghobadian et al. (2012)	Séquence.	N (ND)	1/1	Excl.	N	N	I	I	Multi (Div.)	Post-D (O)	ND	Concentré	N	Makespan	Méta-heuristique
Berghman et al. (2012)	Ordo.	N (ND)	>1/ >1	Comb.	N	N	I	I	Multi (Equiv.)	Pré-D (N)	ND	Par camion	O	Makespan	Ordonnancement de machines, Branch-and-bound
Sadykov (2012)	Séquence.	N (ND)	1/1	Excl.	N	N	L	I	Multi (ND)	Post-D (O)	ND	Concentré	N	Stockage	Programmation dynamique
Bellanger et al. (2013)	Ordo.	N (ND)	>1/ >1	Excl.	N	N	Z	I	Multi (ND)	Pré-D (N)	ND	Concentré	N	Temps de séjour	Heuristiques
Fazel Zarandi et al. (2014)	Séquence.	N (ND)	1/1	Excl.	N	O	Z	I	Multi (ND)	Post-D (O)	ND	Par camion (amont) Concentré (aval)	O	Ecart temps arrivé départ, interruption	PLNE, Programmation par contraintes, heuristiques
Ladier & Alpan (2014)	Ordo.	N (ND)	>1/ >1	Excl.	N	N	I	I	Multi (Equiv.)	Dest. (O)	Nb max.	Par camion	O	Stockage, écart temps arrivée/départ	PLNE, heuristiques
Mohtashami (2015)	Séquence.	N (ND)	1/1	Excl.	N	N	I	I	Multi (Equiv.)	Post-D (O)	ND	Concentré	N	Makespan	Heuristiques
Fanti et al. (2016)	Ordo.	O (Vestimentaire)	>1/>1	Excl.	O	N	I	I	Multi (Div.)	Post-D (O)	ND	Concentré	N	Makespan	PLNE, heuristiques
Keshzari et al. (2016)	Séquence.	N (ND)	1/1	Excl.	N	N	Z	I	Multi (ND)	Post-D (O)	ND	Concentré	N	Makespan	PLNM, méta-heuristique
Maknoon et al. (2017)	Séquence.	N (ND)	1/1	Excl.	N	N	I	I	Mono (Equiv.)	Dest. (O)	Nb max.	Concentré	N	Stockage	PLNE, heuristique

Séquence. : séquençement / Ordo. : ordonnancement / Excl. : exclusif / Comb. : combiné / N : non / O : oui / I : illimité(e) / L : limité(e) / Z : zéro / Div. : diversifié / Equiv. : équivalent / Interch. : interchangeabilité / D : distribution / Dest. : destination / Dim. : dimensionnelle

Tableau 15. Caractérisation des articles analysés (2011 à 2017) traitant l'ordonnancement des activités dans un centre de crossdock

## 4. Conclusion partie I

Nous présentons dans cette première partie de la thèse le contexte de l'industrie automobile, avec un récapitulatif des évolutions des modes de production et leurs impacts sur le management de la chaîne logistique, une analyse du phénomène d'internationalisation présent dans cette industrie depuis quelques décennies et finalement une description du rôle clé joué par les plateformes logistiques dans la performance de la chaîne logistique dans le secteur. Une analyse de notre cas industriel est présentée par la suite. Grâce à notre partenariat avec les constructeurs Renault et Nissan, nous avons pu mener des études terrain qui nous ont permis de comprendre en détail le fonctionnement des plateformes logistiques (appelées AILN), les problématiques associées et la manière dont chaque entreprise a choisi de les aborder. Malgré des méthodes de travail opposées, les plateformes Renault et Nissan présentent des résultats de performance avec très peu d'écarts. Notre travail étant focalisé sur les AILN Renault, nous avons identifié les points d'amélioration en se basant en partie, aux best practices des AILN Nissan.

Le fonctionnement des plateformes logistiques est similaire à celui des centres de crossdocks. Dans ces centres, les produits en provenance des fournisseurs sont déchargés des camions, triés par destination finale et chargés dans des camions pour expédition vers les clients, avec peu d'opérations entre temps. Néanmoins, le fait d'avoir des opérations de repackaging pour certaines pièces et un transport maritime en sortie, font que les approches des problématiques étudiées pour les crossdocks ne répondent pas complètement au besoin des plateformes logistiques dans l'industrie automobile.

Dans la littérature associée au crossdocking, nous retrouvons deux problématiques qui ont reçu beaucoup d'attention. La première se positionne au niveau tactique et vise à définir la planification du réseau logistique associé au centre du crossdock. La définition des flux des produits entre les points du réseau (fournisseurs, crossdocks, clients) doit permettre de minimiser les coûts logistiques (ex. : transport, ouverture, stockage). La deuxième problématique relève des décisions opérationnelles liées à l'ordonnancement des camions en entrée et en sortie de la plateforme et les inducteurs de coûts qui ont un rapport plus direct avec les opérations internes de l'atelier.

Sur la base des analyses présentées dans cette première partie de la thèse, notre apport au niveau industriel pour Renault consistera à proposer une nouvelle approche pour la planification et l'ordonnancement pour ses plateformes logistiques, applicable à moyen terme. Au niveau académique, les modèles mathématiques développés autour du crossdocking comportent des variables et des paramètres peu étudiés dans la littérature actuelle. De plus, sur la base du cas industriel, nous remarquons la forte relation entre ces problèmes de planification et d'ordonnancement, proposant ainsi une approche séquencée en deux étapes, en intégrant des paramètres interdépendants. Ces apports sont présentés dans les trois parties qui suivent.



## II. Planification des flux dans un centre de crossdock

<b>5. Description du problème</b> .....	<b>72</b>
5.1. Hypothèses.....	73
5.2. Caractérisation du problème et comparaison avec la littérature analysée.....	74
5.3. Données d'entrée .....	75
<b>6. Modélisation proposée</b> .....	<b>77</b>
6.1. Variables de décision .....	77
6.2. Formulation mathématique : programmation linéaire en nombres entiers .....	77
6.3. Expérimentations et résultats .....	79
<b>7. Conclusion partie II</b> .....	<b>91</b>

## 5. Description du problème

Nous considérons un réseau logistique avec un centre de crossdock qui agit comme point intermédiaire entre un ensemble de fournisseurs et un ensemble de clients. Le transport en entrée est du transport terrestre et en sortie du transport maritime. Tous les produits doivent passer par la plateforme crossdock. Il s'agit du problème de transbordement dans un réseau logistique avec un centre de crossdock, en prenant en compte les opérations internes dans l'atelier. La principale décision concerne les flux de produits entre les fournisseurs, la plateforme crossdock et les clients, pour chacune des périodes de l'horizon de planification. En parallèle, les activités associées à chaque segment du réseau logistique doivent être définies : en amont, l'estimation du nombre de camions à utiliser, sur la base d'un plan de transport préétabli. En interne, le dimensionnement des ressources et le niveau de stock. En aval, l'estimation du nombre de camions.

En termes d'inducteurs de coûts nous considérons le remplissage de camions en amont, en prenant en compte un coût fixe associé à chaque camion utilisé. Une pénalité est générée par l'utilisation de camions non prévus dans les tournées préétablies. En interne, le coût du stockage et le coût de la main d'œuvre directe sont inclus. Finalement, en aval un coût fixe est associé à chaque camion à mettre en place. Pour rappel, la Figure 20 positionne ce problème par rapport au niveau décisionnel. La Figure 22 présente en détail la description du problème et permet de faire la comparaison avec les approches industrielles de Renault et de Nissan. Ces analyses ont été présentées dans la Section 2.3.

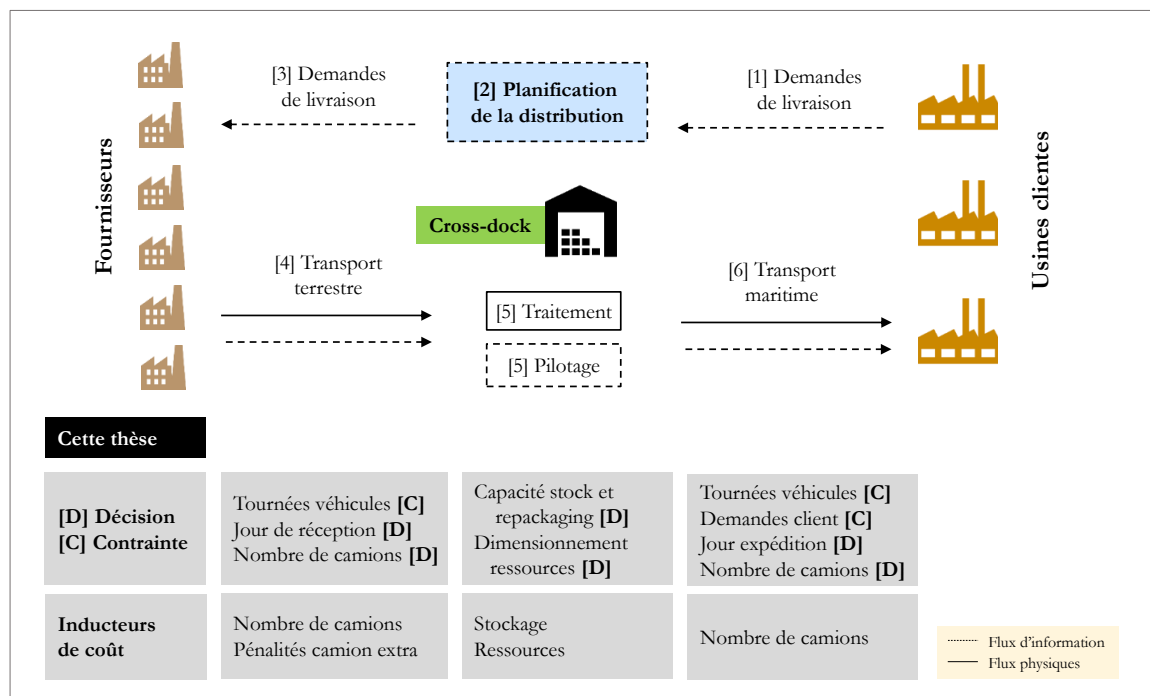


Figure 22. Planification des flux d'un réseau logistique avec un centre de crossdock. Caractérisation de l'approche proposée dans cette thèse

### 5.1. Hypothèses

L'horizon de planification est d'une semaine, avec cinq jours travaillés. Les demandes de composants de la part des clients sont connues et doivent être respectées pour la fin de l'horizon. Nous considérons qu'il n'y a pas de stock en début de semaine. Chaque composant est produit par un seul fournisseur et cette donnée est connue. Les principales informations données pour chaque composant sont : la référence, les dimensions (et donc le volume en m<sup>3</sup>) de l'emballage, la place occupée dans un camion<sup>6</sup> et le type d'opération à subir pendant le transit par la plateforme crossdock.

En amont, l'organisation du transport est sous la responsabilité de la plateforme crossdock. Préalablement, chaque fournisseur est associé à un circuit de transport. Ainsi, chaque composant est associé à un circuit de transport. Pour chaque circuit, l'on connaît les jours de livraison, le nombre de camions à disposition et leur capacité. Une analyse des jours de livraison de tous les circuits est faite de manière régulière, afin de pas créer des jours de pics d'activité. Pendant la phase de planification, si tous les camions à disposition sont utilisés, il est possible d'en demander d'autres, avec une pénalité sur le coût de base.

En interne, nous considérons un atelier avec 4 zones principales : déchargement de camions, repackaging, stockage et chargement de camions. D'autres opérations associées sont le déplacement des emballages et préparation (choix) des emballages pour chargement. Concernant le traitement trois types de flux sont considérées : (1) les flux directs, donc aucune opération n'est réalisée sur l'emballage (*nulle*), (2) le *groupement* des petits colis dans un emballage plus grand et (3) changement ou modification de l'emballage (*conditionnement*). Pour chaque activité, une charge (temps) est allouée et elle est liée aux dimensions de l'emballage. Les capacités de la zone de stockage et des ateliers de repackaging sont connues, ainsi que le temps de travail par jour. En termes de flux nous considérons que tous les composants concernés par des opérations de repackaging seront traités le jour de réception. Ensuite, ils peuvent être expédiés ou mis en attente pour une expédition un jour suivant. Pour les emballages en flux direct, suite à la réception, ils peuvent être expédiés ou mis en zone de stockage. A cause de la grande variabilité de types de colis, toute l'activité interne est modélisée par rapport aux dimensions des emballages et non pas par rapport au nombre.

En aval, la capacité des camions est également connue. Il n'y a pas d'autres contraintes particulières sur le chargement de camions ni sur les horaires de départ. Ceci s'explique par le fait que les camions ont tous une même destination : le port maritime, où ils arriveront au plus tard à la fin de la semaine. Le *cut-off* du bateau étant toujours positionné la semaine suivante.

---

<sup>6</sup> Chez Renault cette valeur est appelée « *métrage linéaire* ». Cette mesure prend en compte l'empilage des colis et donne une approximation sur l'espace occupé par un colis dans un camion.



## 5.2. Caractérisation du problème et comparaison avec la littérature analysée

Le Tableau 16 synthétise la configuration de la problématique que nous traitons, sur la base de ce qui a été décrit dans la première partie de la thèse. Il s'agit du problème de transbordement dans un réseau logistique avec un centre de crossdock, avec des demandes client déterministes. Nous nous basons sur un cas d'étude dans l'industrie automobile et des données réelles sont utilisées pour les expérimentations. Les flux directs entre les fournisseurs et les clients sont interdits. En amont, les tournées de véhicules prédéfinies font que les routes de transport sont restreintes et que des fenêtres de temps journalières s'appliquent. La demande des clients est exprimée par type de produits, et donc elle est considérée étant « agrégée ». Les produits sont conditionnés dans des emballages différents, caractérisés par le volume (m<sup>3</sup>) et le poids (kg). La capacité des camions est définie sur la base de ces deux dimensions. Le stockage temporaire comporte une capacité limitée, tout comme les ateliers de repackaging. Les opérations de déchargement, déplacement et chargement ne sont pas limitées en capacité, mais la charge associée va déterminer les ressources nécessaires pour les réaliser. Les inducteurs des coûts sont le niveau de stockage, les ressources internes, le nombre de camions (amont et aval) et la pénalité d'utilisation des camions supplémentaires en amont. La programmation linéaire en nombres entiers est utilisée pour la modélisation et la résolution du problème.

<b>Problème</b>	Transbordement	<b>Type de produits (emballages)</b>	Multi-produits (Diversifié)
<b>Demande</b>	Déterministe	<b>Stockage</b>	Limité
<b>Données réelles (industrie)</b>	Oui (Automobile)	<b>Capacité traitement</b>	Limité (repackaging) Illimitée (le reste)
<b>Nombre de crossdocks (niveaux intermédiaires)</b>	1 (1)	<b>Fenêtres de temps</b>	Oui (journalières)
<b>Restriction routes transport</b>	Oui	<b>Capacité camions</b>	Dimensionnelle
<b>Flux directs</b>	Non	<b>Inducteurs de coûts</b>	Stockage/traitement Nombre de camions Pénalités (camions extra)
<b>Repackaging</b>	Oui	<b>Méthodes de résolution</b>	PLNE
<b>Flux de produits</b>	Agrégé		

Tableau 16. Caractérisation du problème de planification des flux dans un réseau logistique avec des centres de crossdock, traité dans cette thèse

Des 22 modèles analysés dans la Section 3.6., seulement deux considèrent la demande comme stochastique et le reste la considère déterministe. 6 articles présentent un cas d'étude industriel dont trois dans l'industrie automobile, étudiant la distribution des véhicules finis. Pour

rappel, notre travail se situe en amont, sur la distribution de pièces pour la fabrication de véhicules. Ces deux activités diffèrent sur plusieurs aspects, comme la diversité de produits et la configuration des centres de crossdock. Aucun des 22 modèles analysés ne considèrent une opération du repackaging dans les nœuds intermédiaires du réseau logistique. En revanche, le flux direct est autorisé dans presque la moitié des travaux (10 sur 22). Dans notre étude, ils ne sont pas autorisés, car nous considérons que l'analyse économique des flux directs a été faite au préalable et la décision a été de faire transiter les pièces par le crossdock. Des contraintes sur les routes de transport sont incluses dans 10 articles et des fenêtres de temps dans 7.

Dans plus de la moitié des articles, le stockage n'est pas considéré car les modèles ne prennent pas en compte plusieurs périodes de temps. Les autres articles considèrent un stockage à capacité zéro (1), illimitée (6) ou limitée (3). En ce qui concerne les types de produits, 14 modèles considèrent des réseaux logistiques multi-produits, 6 des réseaux logistiques mono-produit et le reste ne définit pas clairement cette caractéristique. Seulement 3 articles considèrent une capacité des camions dimensionnelle et donc avec des emballages diversifiés ; 6 articles définissent cette capacité comme un nombre maximal de produits (emballages équivalent) et les 13 restants ne prennent pas en compte ce paramètre. En termes d'inducteurs de coût, 13 modèles sur les 22 incluent des coûts de stockage et traitement, mais aucun ne propose une estimation des ressources nécessaires pour traiter les produits. 20 modèles considèrent le transport comme inducteur de coût, mais seulement 8 le définissent comme le nombre de camions utilisé. Finalement, 8 articles considèrent le coût d'ouverture d'installations. Concernant les méthodes de résolution, 15 travaux proposent des méthodes exactes (dont 9 utilisant la programmation linéaire), 16 articles développent des méthodes heuristiques et 2 de la simulation.

### 5.3. Données d'entrée

Ci-dessous nous décrivons les indices utilisés dans la modélisation, les données concernant les composants et les paramètres liés aux composants et à chaque segment du réseau logistique : amont, interne et aval.

#### Indices

$a \in A$  Opérations dans l'atelier (1 : direct, 2 : groupement, 3 : conditionnement)

$c \in C$  Composants.

$j \in J$  Périodes de temps (jours de la semaine [1,5]).

$k \in K$  Destinations (clients).

$l \in L$  Origines (circuits de transport).

### Paramètres composants

- $q_{c,k}$  Quantité du composant  $c$  demandé par le client  $k$ .
- $v_c$  Volume ( $m^3$ ) du composant  $c$ .
- $m_c$  Métrage linéaire (m) du composant  $c$  (place occupée dans le camion).
- $r_{c,a}$  1 si le composant  $c$  est concerné par l'opération  $a$ , 0 sinon.
- $it_{c,l}$  1 si le composant  $c$  est livré dans le circuit  $l$ , 0 sinon.

### Paramètres amont

- $pv_{j,l}$  Nombre de camions à disposition pour le circuit  $l$ , le jour  $j$ .
- $vit$  Capacité maximale (en m) d'un camion (transport amont).
- $cit_l$  Coût fixe d'un camion pour le circuit  $l$ .
- $rs$  Pénalité (ratio) générée par la demande d'un camion supplémentaire.
- $mit$  Temps de réception d'un camion amont.
- $M$  Grand nombre.

### Paramètres internes

- $wun$  Temps de déchargement d'emballages (par  $m^3$ ).
- $wst$  Temps (par  $m^3$ ) de l'opération de stockage.
- $wre_a$  Temps (par  $m^3$ ) de l'opération  $a$ .
- $wlo$  Temps de chargement d'emballages (par  $m^3$ ).
- $wd$  Temps total travaillé par période de temps (par jour).
- $sm$  Capacité maximale ( $m^3$  par jour) de la zone de stockage.
- $rep$  Capacité maximale ( $m^3$  par jour) des ateliers de repackaging.
- $cst$  Coût de stockage (par  $m^3$ , par jour)
- $cvf$  Coût main d'œuvre (par personne, par semaine).

### Paramètres aval

- $vot$  Capacité maximale (en m) d'un camion (transport aval).
- $wot$  Temps de expédition d'un camion aval.
- $cot_k$  Coût fixe d'un camion pour la destination  $k$ .

## 6. Modélisation proposée

Ci-dessous nous décrivons les variables de décision et la formulation mathématique du modèle, en utilisant la programmation linéaire en nombres entiers.

### 6.1. Variables de décision

- $X_{c,j}$  Quantité du composant  $c$  à recevoir le jour  $j$ .
- $IT_{j,l}$  Approximation du nombre de camions disponibles (prévus dans le plan transport) à utiliser le jour  $j$ , pour circuit  $l$ .
- $ITS_{j,l}$  Approximation du nombre de camions supplémentaires à utiliser le jour  $j$ , pour le circuit  $l$ .
- $W$  Dimensionnement de la main d'œuvre pour la semaine.
- $S_{c,j}$  Quantité du composant  $c$  stockée le jour  $j$ .
- $Y_{c,j,k}$  Quantité du composant  $c$  à expédier le jour  $j$ , pour le client  $k$ .
- $OT_{j,k}$  Approximation du nombre de camions à utiliser le jour  $j$ , à destination  $k$ .

### 6.2. Formulation mathématique : programmation linéaire en nombres entiers

La fonction objectif et les contraintes associées sont présentées ci-dessous :

$$\text{Min } Z = \text{Transport amont} + \text{Stock} + \text{Main d'oeuvre} + \text{Transport aval} \quad (1)$$

**Où :**

$$\text{Transport amont} = \sum_{j,l} \{ [IT_{j,l} + ITS_{j,l} * (1+rs*0.01)] * cit_l \} \quad (2)$$

$$\text{Stock} = \sum_{c,j} (S_{c,j} * v_c * cst) \quad (3)$$

$$\text{Main d'oeuvre} = W * cwf \quad (4)$$

$$\text{Transport aval} = \sum_{j,k} (OT_{j,k} * cot_k) \quad (5)$$

**Contraintes :**

$$\sum_j X_{c,j} = \sum_k q_{c,k} \quad \forall c \quad (6)$$

$$\sum_c X_{c,j} * it_{c,l} * m_c \leq (IT_{j,l} + ITS_{j,l}) * vit \quad \forall j,l \quad (7)$$

$$IT_{j,l} \leq pv_{j,l} \quad \forall j,l \quad (8)$$

$$ITS_{j,l} \leq M * pv_{j,l} \quad \forall j,l \quad (9)$$

$$S_{c,j} = X_{c,j} - \sum_k Y_{c,j,k} \quad \forall c,j=1 \quad (10)$$

$$S_{c,j} = S_{c,j-1} + X_{c,j} - \sum_k Y_{c,j,k} \quad \forall c,j > 1 \quad (11)$$

$$\begin{aligned} W \geq [1/wd] * [\sum_l wit * (IT_{j,l} + ITS_{j,l}) + \\ \sum_c v_c * (X_{c,j} * (wun + \sum_a r_{c,a} * wre_a) + \\ S_{c,j} * wst + \sum_k Y_{c,j,k} * wlo) + \\ \sum_k wot * OT_{j,k}] \quad \forall j \quad (12) \end{aligned}$$

$$\sum_c S_{c,j} * v_c \leq sm \quad \forall j \quad (13)$$

$$\sum_c X_{c,j} * v_c * \sum_{a' \in [2,3]} r_{c,a'} \leq rep \quad \forall j \quad (14)$$

$$\sum_j Y_{c,j,k} = q_{c,k} \quad \forall c,k \quad (15)$$

$$\sum_c Y_{c,j,k} * m_c \leq OT_{j,k} * vot \quad \forall j,k \quad (16)$$

$$X_{c,j} ; Y_{c,j,k} ; S_{c,j} \in \mathbb{N} \quad \forall c,j,k \quad (17)$$

$$IT_{j,l} ; ITS_{j,l} ; OT_{j,k} \in \mathbb{N} \quad \forall j,k,l \quad (18)$$

La fonction objectif en (1) cherche à minimiser le coût total. Il est divisé en quatre composantes : transport amont, stockage et main d'œuvre internes et transport aval, représentées respectivement par les équations (2) à (5). Le transport amont est caractérisé par le coût fixe par camion utilisé, ainsi que la pénalité associée à l'utilisation des camions supplémentaires. Le coût interne est représenté par le niveau de stockage et le dimensionnement de la main d'œuvre directe. Finalement, le transport aval est caractérisé par le coût fixe par camion utilisé.

Les contraintes relatives à l'activité amont sont représentées par les équations (6) à (9). D'abord, la contrainte (6) garantit que tous les produits demandés par les clients soient reçus. La capacité des camions est prise en compte dans (7). Les équations (8) et (9) représentent le plan transport préétabli, en termes du nombre de camions mis à disposition pour chaque circuit. L'équation (9) contraint utilisation de camions supplémentaires uniquement si les camions à disposition sont tous utilisés. Les contraintes liées aux opérations internes sont représentées dans les équations (10) à (14). Les contraintes (10) et (11) visent à équilibrer le flux et le stockage des produits : le niveau de stock de la période en cours correspond au niveau de la période précédente, plus la quantité reçue, moins la quantité expédiée (nous rappelons l'hypothèse sur l'absence de stock au début de l'horizon de planification). Le dimensionnement de la main d'œuvre est caractérisé en (12), en prenant en compte de la charge induite par chaque opération dans l'atelier (réception des camions, déchargement des emballages, repackaging, stockage, chargement des emballages et expédition des camions). Les équations (13) et (14) représentent, respectivement, les capacités de la zone de stockage et des ateliers de repackaging. Les contraintes sur l'activité aval sont représentées par les équations (15) et (16). L'équation (15)

garantit le respect des demandes clients et la contrainte (16) représente la capacité des camions. Finalement, les équations (17) et (18) sont des contraintes sur les nombres entiers.

### 6.3. Expérimentations et résultats

Ci-dessous nous présentons la méthodologie appliquée pour la génération des instances, les expérimentations menées et l'analyse des résultats.

#### 6.3.1. Génération et caractéristiques des instances testées

La plupart des paramètres d'entrée présentés dans la Section 5.3 ont été initialisés sur les bases de données réelles de deux plateformes AILN Renault, sur une période de 8 semaines pour chacune. Pour certains d'entre eux, nous avons fait des hypothèses car nous n'avons pas pu récupérer les données réelles. Le Tableau 17 présente les différentes instances générées à partir des données collectées. La plateforme # 1 fournit environ 9 clients (destinations) sur un ensemble d'environ 2000 références (composants) distinctes, dont 40% nécessitent une opération de repackaging. En termes de volume traité, la semaine la plus chargée est la semaine 5, avec plus de 5000 mètres cubes à traiter (dont 6% de repackaging) qui se traduisent par 11910 emballages (nombre total de composants). La semaine 8 affiche la charge la plus faible, avec moins de 4000 mètres cubes (dont 2% de repackaging) et à peine plus de 5000 emballages. Le reste des instances sont dans ces intervalles.

En amont, un ensemble de 350 fournisseurs livrent les pièces à travers une trentaine de circuits de transport (origines). 20 de ces circuits sont des circuits directs (de un à quatre fournisseurs) et représentent 60% du volume total. Le reste des fournisseurs passent par des plateformes de groupage intermédiaire, qui sont responsables de l'organisation des ramasses auprès des fournisseurs jusqu'à la plateforme, où les pièces sont déchargées et rechargées dans des camions organisés par l'AILN Renault. La plateforme # 2 fournit moins de destinations (6 ou 7) mais fait environ 70% de volume de plus que la plateforme # 1. Le nombre de composants augmente, quant à lui, de 45% et le nombre d'emballages représente une moyenne de 15000. Le repackaging représente 30% du volume total traité. En amont, les 160 fournisseurs sont distribués sur 46 circuits, dont 6 qui sont des circuits de plateforme de groupage (25% du volume).

Plateforme # 1						
Instance (semaine)	Composants [C]	Destinations [K]	Origines [L]	Nombre total composants	Volume total (m <sup>3</sup> )	Volume repackaging (m <sup>3</sup> )
1	1898	8	27	11893	4034,87	308,83
2	1535	9	26	11008	3962,01	343,83
3	1787	9	28	11606	4292,14	357,13
4	1644	8	28	9642	4582,39	297,28
5	1528	9	28	11910	5106,45	316,40
6	1326	9	27	6937	3803,25	220,15
7	1428	9	28	8504	4510,81	297,68
8	938	9	27	5154	3647,63	113,95

Plateforme # 2						
Instance (semaine)	Composants [C]	Destinations [K]	Origines [L]	Nombre total composants	Volume total (m <sup>3</sup> )	Volume repackaging (m <sup>3</sup> )
1	2105	6	40	13151	7123,44	2147,32
2	2064	6	43	14655	7524,59	2152,29
3	2057	6	42	12423	6896,95	2258,20
4	2317	7	46	14329	7968,20	2355,72
5	2392	7	45	17269	9538,99	2997,12
6	2597	7	46	19552	10450,58	3367,87
7	2199	7	45	15494	7258,88	1777,16
8	1912	7	44	12925	5331,70	1288,07

Tableau 17. Taille des instances utilisées dans les expérimentations dans la Partie II

Le Tableau 18 présente les capacités des moyens de transport dans le réseau logistique et les capacités dans l'atelier du crossdock. Sur la base de notre cas industriel, ces capacités sont liées aux dimensions des emballages et à la place occupée dans le camion (*métrage linéaire*). Les capacités de stockage et de l'atelier de repackaging sont définies en mètres cubes par jour. Pour chacune des plateformes, les valeurs des capacités internes sont proportionnelles à l'activité moyenne hebdomadaire.

Plateforme # 1			Plateforme # 2		
Paramètre	Description	Capacité	Paramètre	Description	Capacité
vit	Camions amont	13,0 [m]	vit	Camions amont	13,2 [m]
sm	Zone stockage	800 [m <sup>3</sup> / jour]	sm	Zone stockage	1500 [m <sup>3</sup> / jour]
rep	Ateliers repackaging	125 [m <sup>3</sup> / jour]	rep	Ateliers repackaging	700 [m <sup>3</sup> / jour]
vot	Camions aval	12 [m]	vot	Camions aval	12 [m]

Tableau 18. Paramètres liés aux capacités du réseau logistique et aux capacités internes des plateformes crossdock étudiées dans la Partie II

Les coûts de transport et des opérations dans la plateforme de crossdock sont présentés dans le Tableau 19. Les coûts de transport varient selon l'origine (en amont du crossdock) et la destination (en aval). En amont, autre que le coût par camions, nous incluons la pénalité générée par l'utilisation d'un camion supplémentaire (en pourcentage par rapport au coût d'un camion programmé). En interne, le coût du stockage est donné par mètre cube et celui de la main d'œuvre par semaine, par opérateur. En aval, le coût par camion est indiqué. Nous supposons que la plateforme # 1 est localisée géographiquement dans un pays où la main d'œuvre et la surface sont plus chères. Cela explique les écarts des coûts par rapport à la plateforme # 2.

Plateforme # 1			Plateforme # 2		
Paramètre	Description	Coût	Paramètre	Description	Coût
cit <sub>l</sub>	Camions amont	de 300 à 1200	cit <sub>l</sub>	Camions amont	de 200 à 1600
r	Pénalité camion supp.	30%	r	Pénalité camion supp.	20%
cst	Stockage	5 [par m <sup>3</sup> ]	cst	Stockage	1 [par m <sup>3</sup> ]
cwf	Main d'œuvre (opérateur)	900 [par semaine]	cwf	Main d'œuvre (opérateur)	300 [par semaine]
cot <sub>k</sub>	Camions aval	de 600 à 1400	cot <sub>k</sub>	Camions aval	de 700 à 1200

Tableau 19. Paramètres liés aux coûts des activités du réseau logistique et aux coûts internes des plateformes crossdock étudiées dans la Partie II

Finalement, le Tableau 20 décrit la charge de travail associée à chaque opération réalisée dans l'atelier de la plateforme crossdock. Les activités de déchargement et chargement des camions ont un temps fixe associé. Les temps d'opération des activités réalisées sur les emballages sont liés au volume (mètres cubes) de l'emballage traité. Pour rappel, l'opération de traitement d'un emballage peut être *nulle* (flux direct), de *groupement* ou de *conditionnement*. La seule différence entre les deux plateformes analysées est le temps total de travail, qui pour la plateforme # 1 est de 420 minutes par jour et pour la plateforme # 2 de 480 minutes par jour.



Paramètre	Description	Valeur
wit	Réception camion	17,0 [min]
wun	Déchargement emballage	3,4 [min/m <sup>3</sup> ]
wst	Stockage emballage	0,7 [min/m <sup>3</sup> ]
wre <sub>a</sub>	Traitement emballage	0 / 18,7 / 53,1 [min/m <sup>3</sup> ]
wlo	Chargement emballage	2,6 [min/m <sup>3</sup> ]
wot	Expédition camion	20,0 [min]
wd	Temps de travail	420-480 [min]

Tableau 20. Paramètres liés à la charge de travail dans l'atelier des plateformes crossdock étudiées dans la Partie II

### 6.3.2. Expérimentations

Le modèle proposé est implémenté et testé dans CPLEX, en utilisant une CPU AMD A8-4500M @ 1.9GHz de 8GB RAM. Le Tableau 21 montre les statistiques des expérimentations, notamment le nombre de variables et de contraintes, ainsi que la performance de CPLEX, en termes de temps de calcul. Toutes les instances sont résolues en moins de six minutes, ce qui nous paraît un temps adapté à la prise de décisions sur la planification hebdomadaire. La taille des problèmes en nombre de variables, reste dans l'intervalle 51906-117361 et en nombre de contraintes entre 13116 et 33779. Sans surprise, les instances liées à la plateforme # 2 sont plus grandes que celles générées avec les données de la plateforme # 1. Ceci est principalement à cause d'un nombre de composants et d'origines plus importants, malgré un nombre plus faible de destinations.

Afin de comparer les résultats de notre modèle avec la méthode actuelle de planification dans les AILN Renault, nous avons réalisé deux simulations supplémentaires. La première consiste à respecter les programmes de réception, de traitement et d'expédition calculés par la méthode de planification Renault. Tous les inducteurs de coûts sont fixés par cette méthode et cela nous donne une première valeur de référence pour le coût total des activités du réseau logistique et du centre de crossdock. Dans l'analyse présentée dans la Chapitre 2, nous avons décrit ce qui se passe en pratique dans l'atelier des AILN ne correspond pas forcément à ce qui a été planifié, notamment sur l'expédition de produits. Ainsi, la deuxième simulation consiste à respecter uniquement le programme de réception. Ceci va contraindre le coût du transport amont et le coût interne, sur le dimensionnement des ressources (en raison de la charge générée sur l'opération de repackaging, qui est liée à la réception de produits). Pour le reste des activités, c'est-à-dire, le niveau de stockage et le chargement des camions, nous laissons notre modèle trouver la meilleure solution. Nous considérons que la modélisation proposée peut correspondre à ce qui se passe dans la réalité, où l'objectif principal est celui de minimiser le nombre de camions au départ de la plateforme crossdock. Une hypothèse supplémentaire est

faite sur le coût du transport amont : malgré un programme de réception non optimisé, des optimisations opérationnelles permettent de diminuer l'impact sur la performance (nous considérons une diminution de 15% pour la plateforme # 1 et de 20% pour la plateforme # 2, sur la base de notre étude industrielle). La Figure 23 synthétise ce qui vient d'être décrit.

Plateforme # 1								
Semaine Statistiques	1	2	3	4	5	6	7	8
Variables	95211	84731	98611	82521	84366	73246	78866	51906
Contraintes	24491	20215	23369	21503	20261	17772	19061	13116
CPU time (s)	345	86	161	204	78	77	48	28

Plateforme # 2								
Semaine Statistiques	1	2	3	4	5	6	7	8
Variables	84631	83021	82731	104761	108126	117361	99441	84631
Contraintes	27335	26993	26859	30419	31264	33779	28948	27335
CPU time (s)	250	376	365	102	169	259	237	102

Tableau 21. Statistiques sur les expérimentations dans CPLEX pour la méthode proposée dans la Partie II

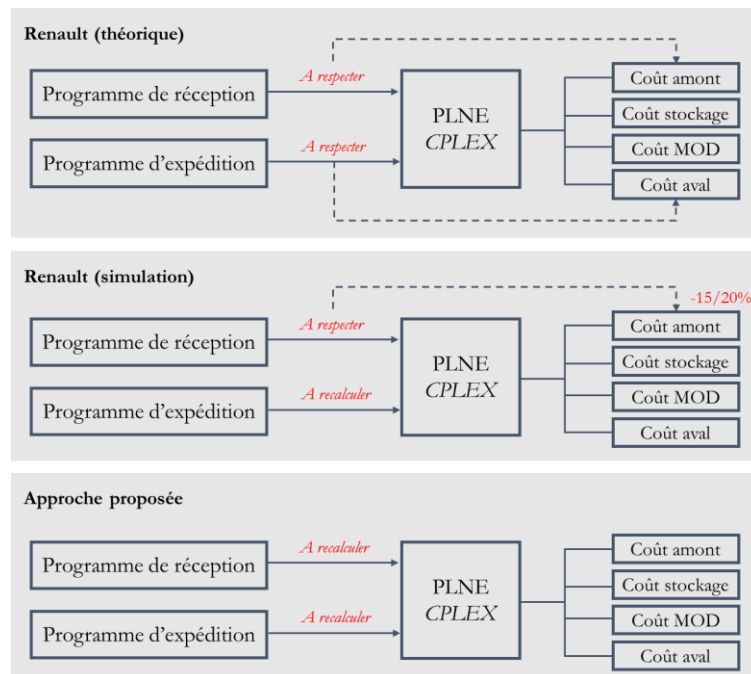


Figure 23. Approches appliquées à chaque instance étudiée dans la Partie II

### 6.3.3. Analyse de résultats

Le Tableau 22 présente les résultats des expérimentations sur les 8 instances de la plateforme # 1. La Figure 24 décrit les résultats sous forme de courbes, pour mieux les visualiser. Finalement, le Tableau 23 indique les pourcentages de réduction des coûts obtenue par l'approche proposée, en comparaison avec les méthodes Renault.

Sur les résultats de la plateforme # 1, nous constatons que l'approche proposée permet de réduire le coût total de 30% (moyenne par semaine) en comparaison avec la méthode théorique de Renault. Ce résultat corrobore l'impact du processus de planification actuelle, dans lequel les moyens de transport ne sont pas optimisés du tout. En amont, le coût est réduit, en moyenne, de 32% et en aval de 19%. La différence s'explique car les points d'origine sont plus nombreux ( $\sim 27$ ) que les points de destination ( $\sim 9$ ) est donc en amont il y a potentiellement plus de camions qui sont mal remplis. En interne, comme la charge n'est pas prise en compte par la méthode de planification, des pics d'activité sont créés et influencent le dimensionnement hebdomadaire de la main d'œuvre. L'approche proposée établit un dimensionnement qui donne un coût presque divisé par deux (-42%). Le coût de stockage est pratiquement réduit à zéro, ce qui montre qu'une synchronisation des flux entrants et sortants est possible, tout en optimisant le reste des coûts logistiques. La réduction des coûts la plus importante (-37%) correspond à la semaine 8. Il s'agit de la semaine avec le plus faible volume à traiter ( $3648 \text{ m}^3$ ). En revanche, la réduction la moins importante (-25%) nous la retrouvons dans la semaine 5, qui correspond à celle avec la plus forte volumétrie ( $5107 \text{ m}^3$ ). Cet écart est lié principalement aux coûts du transport aval, qui sont directement impactés par la volumétrie traitée.

En comparant les résultats des méthodes théorique et simulée de Renault, nous constatons en effet qu'une fois que les produits sont réceptionnés à la plateforme, le stockage permet, d'une part, de réguler la charge de travail et donc d'avoir un dimensionnement de ressources moins important, et d'autre part d'optimiser le chargement des conteneurs.

Nous nous intéressons maintenant à la comparaison entre l'approche proposée et la méthode Renault simulée. Logiquement, la réduction du coût total est moins importante que dans la première analyse et au lieu de 30%, l'approche proposée fournit des solutions 17% moins chères, en moyenne par semaine. Concernant le transport amont, nous rappelons que nous avons fait l'hypothèse, sur la base de l'étude industrielle, que le coût du transport amont pouvait être réduit à hauteur de 15% par rapport au coût du programme de réception théorique. Malgré cette hypothèse, l'approche proposée fournit une solution avec un coût de transport 20% inférieur (en moyenne par semaine) que la méthode simulée. En interne, le stockage est pratiquement supprimé et le dimensionnement de la main d'œuvre se traduit par un coût inférieur de 36%. En aval, les deux coûts sont équivalents. Ceci n'est pas étonnant si nous rappelons que le focus de l'activité Renault (méthode simulée) est de minimiser le nombre de camions en sortie.

		AILN Renault # 1								
		Semaine Coûts	1	2	3	4	5	6	7	8
Méthode Renault (théorique)	Amont	109 204	107 106	118 804	126 081	127 914	103 971	116 349	99 034	
	Interne [st]	7 690	7 950	7 565	8 050	9 487	7 894	7 529	6 767	
	Interne [mod]	27 000	26 100	31 500	31 500	34 200	27 900	33 300	27 900	
	Aval	89 110	93 049	97 792	101 942	109 288	81 833	95 734	85 158	
	<b>Total</b>	<b>233 004</b>	<b>234 205</b>	<b>255 661</b>	<b>267 573</b>	<b>280 889</b>	<b>221 598</b>	<b>252 912</b>	<b>218 859</b>	
Méthode Renault (simulation)	Amont	92 823	91 040	100 983	107 169	108 727	88 375	98 897	84 179	
	Interne [st]	4 720	4 925	5 550	5 700	5 513	4 295	4 980	2 775	
	Interne [mod]	23 400	23 400	28 800	27 900	31 500	24 300	30 600	27 000	
	Aval	73 932	73 656	78 658	82 427	90 641	70 133	80 731	63 207	
	<b>Total</b>	<b>194 875</b>	<b>193 021</b>	<b>213 991</b>	<b>223 196</b>	<b>236 381</b>	<b>187 103</b>	<b>215 208</b>	<b>177 161</b>	
Méthode proposée	Amont	81 690	80 528	88 703	101 051	107 178	70 077	78 136	67 571	
	Interne [st]	4	70	10	150	41	1	10	0	
	Interne [mod]	17 100	18 000	18 900	18 900	20 700	14 400	18 000	12 600	
	Aval	73 932	73 656	78 658	82 427	90 641	84 160	96 877	75 848	
	<b>Total</b>	<b>172 726</b>	<b>172 254</b>	<b>186 271</b>	<b>202 528</b>	<b>218 560</b>	<b>168 637</b>	<b>193 023</b>	<b>156 019</b>	

Tableau 22. Résultats des expérimentations des trois méthodes étudiées, pour l'AILN Renault # 1

		AILN Renault # 1								
		Semaine Coûts	1	2	3	4	5	6	7	8
Proposée vs Renault (théorique)	Amont	-31%	-31%	-32%	-27%	-23%	-38%	-38%	-37%	
	Interne [st]	-100%	-99%	-100%	-98%	-100%	-100%	-100%	-100%	
	Interne [mod]	-37%	-31%	-40%	-40%	-39%	-48%	-46%	-55%	
	Aval	-17%	-21%	-20%	-19%	-17%	-14%	-16%	-26%	
	<b>Total</b>	<b>-29%</b>	<b>-29%</b>	<b>-30%</b>	<b>-27%</b>	<b>-25%</b>	<b>-33%</b>	<b>-33%</b>	<b>-37%</b>	
Proposée vs Renault (simulation)	Amont	-19%	-19%	-19%	-14%	-10%	-27%	-28%	-26%	
	Interne [st]	-100%	-99%	-100%	-97%	-99%	-100%	-100%	-100%	
	Interne [mod]	-27%	-23%	-34%	-32%	-34%	-41%	-41%	-53%	
	Aval	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
	<b>Total</b>	<b>-15%</b>	<b>-14%</b>	<b>-16%</b>	<b>-13%</b>	<b>-11%</b>	<b>-20%</b>	<b>-21%</b>	<b>-22%</b>	

Tableau 23. Réduction des coûts obtenue avec l'approche proposée, vis-à-vis des méthodes Renault, pour les expérimentations de la plateforme # 1

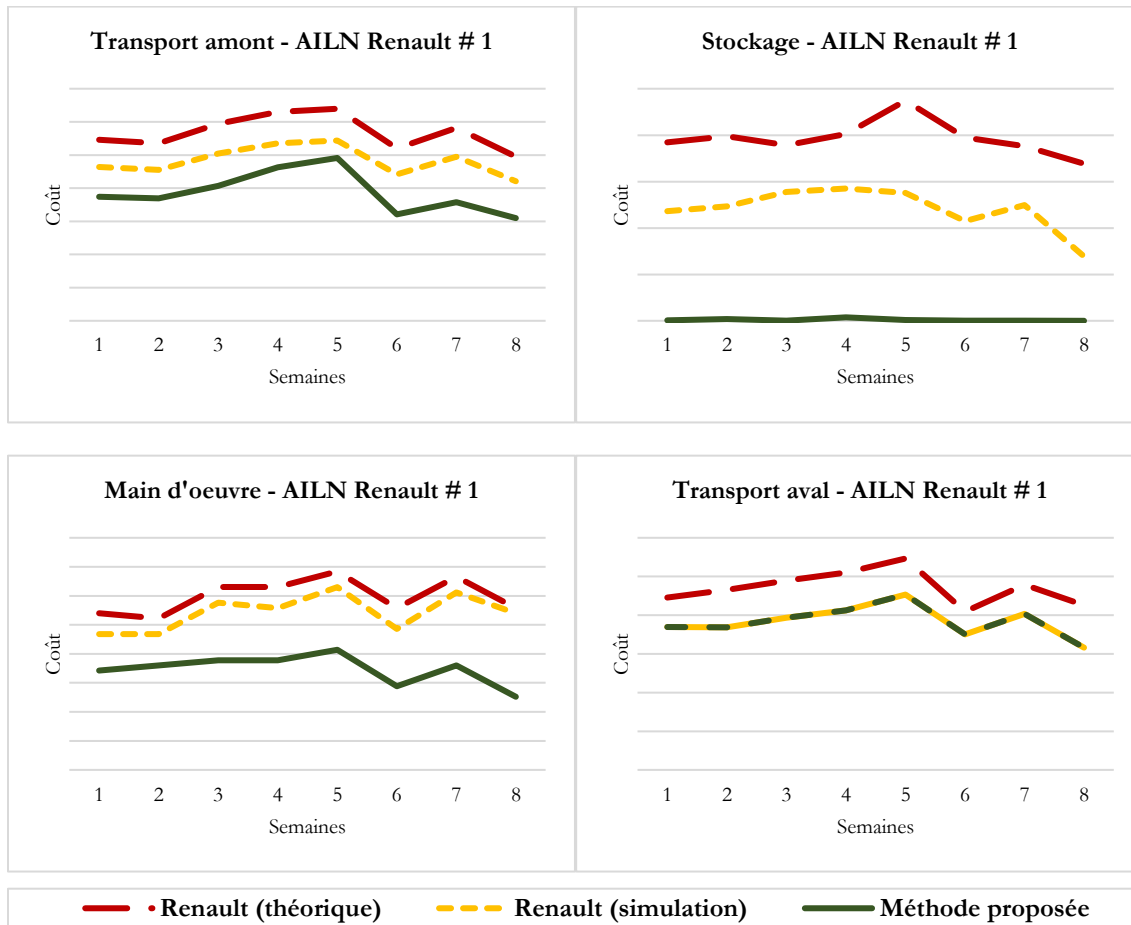


Figure 24. Graphiques des résultats des expérimentations pour l'AILN Renault # 1. Comparatif entre les différentes méthodes de planification

Le Tableau 24 présente les résultats des expérimentations sur les 8 instances de la plateforme # 2, pour chaque méthode étudiée (Renault théorique, Renault simulée et approche proposée). La Figure 25 décrit les résultats sous forme de courbes, pour mieux les visualiser. Finalement, le Tableau 25 indique les pourcentages de réduction des coûts obtenue par l'approche proposée, en comparaison avec les méthodes Renault.

En analysant les résultats des expérimentations de la plateforme # 2, nous constatons les mêmes tendances décrites pour les expérimentations de la plateforme # 1. Néanmoins, un point important à souligner est que la réduction du coût total obtenue avec l'approche proposée est moins importante : -25% en moyenne par semaine par rapport à la méthode Renault théorique et -12% en moyenne par semaine par rapport à la méthode Renault simulée. Ceci s'explique surtout par le fait que le nombre de points de destination est inférieure (6 ou 7) pour une volumétrie supérieure (~70%). En conséquence, l'écart des coûts du transport aval est inférieur. De la même manière, la réduction des coûts internes est moins importante, d'une part l'effet du non lissage de l'activité impacte moins le dimensionnement de la main d'œuvre et d'autre part car plus de pièces sont disponibles chaque jour pour expédition et donc le stockage est moindre.

		AILN Renault # 2								
		Semaine Coûts	1	2	3	4	5	6	7	8
Méthode Renault (théorique)	Amont	165 912	167 215	160 842	175 206	186 007	191 975	176 410	157 692	
	Interne [st]	1 546	1 873	1 306	1 755	1 913	1 942	1 776	1 454	
	Interne [mod]	26 400	24 300	25 500	30 000	33 900	38 400	26 400	12 600	
	Aval	119 270	128 243	120 846	140 333	162 344	174 164	125 524	101 176	
	<b>Total</b>	<b>313 128</b>	<b>321 631</b>	<b>308 494</b>	<b>347 294</b>	<b>384 164</b>	<b>406 481</b>	<b>330 110</b>	<b>272 922</b>	
Méthode Renault (simulation)	Amont	132 730	133 772	128 674	140 165	148 806	153 580	141 128	126 154	
	Interne [st]	1 617	2 171	1 920	1 576	1 900	1 605	1 481	1 283	
	Interne [mod]	24 900	22 800	24 000	28 500	32 700	36 900	24 900	12 300	
	Aval	110 229	117 494	106 681	125 694	148 213	161 853	111 492	87 181	
	<b>Total</b>	<b>269 475</b>	<b>276 237</b>	<b>261 275</b>	<b>295 935</b>	<b>331 619</b>	<b>353 938</b>	<b>279 001</b>	<b>226 918</b>	
Méthode proposée	Amont	104 623	110 196	97 288	117 616	131 958	133 811	118 799	89 888	
	Interne [st]	34	22	0	2	28	17	14	1	
	Interne [mod]	18 900	18 900	19 500	20 700	25 800	28 800	16 200	11 700	
	Aval	110 229	117 494	106 681	125 694	148 213	161 853	111 492	87 181	
	<b>Total</b>	<b>242 505</b>	<b>255 795</b>	<b>231 576</b>	<b>273 813</b>	<b>316 996</b>	<b>348 632</b>	<b>256 405</b>	<b>196 260</b>	

Tableau 24. Résultats des expérimentations pour l'AILN Renault # 2.

		AILN Renault # 2								
		Semaine Coûts	1	2	3	4	5	6	7	8
Proposée vs Renault (théorique)	Amont	-37%	-34%	-40%	-33%	-29%	-30%	-33%	-43%	
	Interne [st]	-98%	-99%	-100%	-100%	-99%	-99%	-99%	-100%	
	Interne [mod]	-28%	-22%	-24%	-31%	-24%	-25%	-39%	-7%	
	Aval	-8%	-8%	-12%	-10%	-9%	-7%	-11%	-14%	
	<b>Total</b>	<b>-25%</b>	<b>-23%</b>	<b>-28%</b>	<b>-24%</b>	<b>-20%</b>	<b>-20%</b>	<b>-25%</b>	<b>-31%</b>	
Proposée vs Renault (simulation)	Amont	-21%	-18%	-24%	-16%	-11%	-13%	-16%	-29%	
	Interne [st]	-98%	-99%	-100%	-100%	-99%	-99%	-99%	-100%	
	Interne [mod]	-24%	-17%	-19%	-27%	-21%	-22%	-35%	-5%	
	Aval	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
	<b>Total</b>	<b>-13%</b>	<b>-11%</b>	<b>-14%</b>	<b>-11%</b>	<b>-8%</b>	<b>-8%</b>	<b>-12%</b>	<b>-17%</b>	

Tableau 25. Réduction des coûts obtenue avec l'approche proposée, vis-à-vis des méthodes Renault, pour les expérimentations de la plateforme # 2

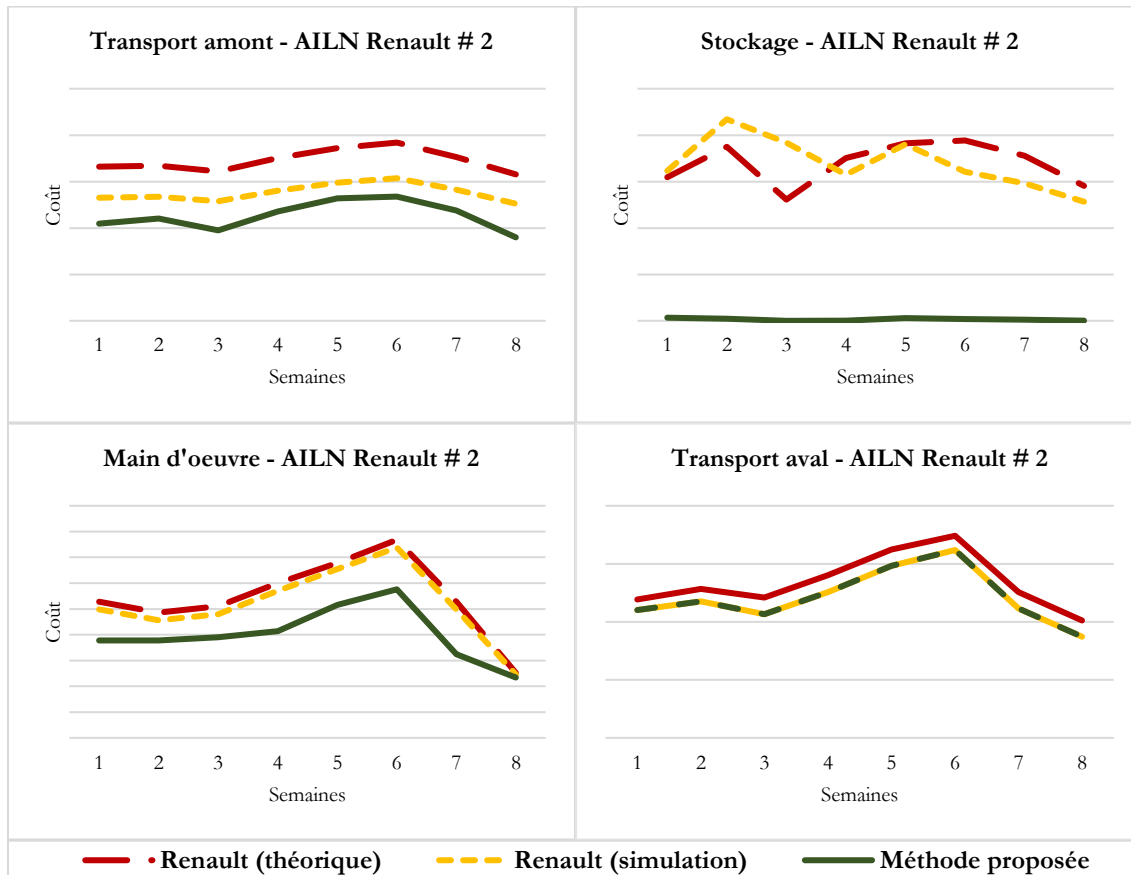


Figure 25. Graphiques des résultats des expérimentations pour l'AILN Renault # 2. Comparatif entre les différentes méthodes de planification

Sur les résultats de l'approche proposée, l'analyse sur le transport amont nous permet de constater que la moyenne du taux remplissage des camions est considérablement inférieure à la capacité maximale : 23% pour la plateforme # 1 et 15% pour la plateforme # 2. De même, en analysant la volumétrie pour chaque point d'origine, nous remarquons que notre modèle fournit des solutions qui représentent le nombre minimum de camions nécessaires pour transporter tous les produits demandés. L'écart entre la moyenne et la capacité maximale s'explique principalement par la manière dont le plan transport est préétabli, mais aussi à l'impact des « derniers » camions, qui doivent transporter le reliquat de produits.

En aval, les solutions fournies, en nombre de camions, représentent le minimum nécessaire pour transporter tous les produits. En revanche, la moyenne du taux de remplissage est plus proche de la capacité maximale. Pour la plateforme # 1 l'écart est 11% et pour la plateforme # 2 de 4%. Le nombre de destinations en départ de la plateforme # 1 est supérieur à celui de la plateforme # 2 (9 contre 7), donc l'impact du « dernier » camion est moins important.

Dans la section suivante nous présentons les résultats d'une des semaines analysées, afin d'illustrer ce que nous venons de décrire.

#### 6.3.4. Illustration des résultats sur une des instances

La Figure 26 présente les résultats détaillés de l'approche proposée, sur une des instances de la plateforme # 2. Tout d'abord, en entrée de la plateforme nous retrouvons 145 camions au total dont 10 camions extra (en dehors du plan de transport préétabli). Cela donne une moyenne de 29 camions par jour, avec un écart type de 2,6. Le taux de remplissage moyen est de  $51,9 \text{ m}^3$ , contre une capacité maximale de  $65 \text{ m}^3$ . Après vérification, le résultat du modèle correspond au minimum de camions nécessaires pour transporter tous les produits demandés.

En interne, la charge totale par jour est équilibrée, ce qui se traduit par un dimensionnement de la main d'œuvre qui est similaire pour chaque jour. Le nombre d'opérateurs nécessaires pour la semaine est défini par le jour qui représente le maximum. Dans l'exemple cela correspond à 63 personnes. Nous rappelons que la charge totale de travail inclus les opérations de réception, de déchargement, de stockage, de repackaging, de chargement et d'expédition. Nous pouvons constater aussi que le stockage est pratiquement supprimé, jeudi étant le jour où l'on stocke le plus ( $14,2 \text{ m}^3$ ). Cela reste très inférieur à la capacité maximale qui est de  $1200 \text{ m}^3$  par jour. Les résultats sur l'activité de repackaging montrent une charge lissée, respectant la capacité de  $700 \text{ m}^3$  par jour.

Finalement, en départ le modèle propose 115 conteneurs, répartis de manière équilibrée sur les 5 jours (23 de moyenne et 1,9 d'écart type). Nous avons vérifié la volumétrie des 6 destinations (clients) et le résultat proposé par le modèle correspond au nombre minimum de conteneurs nécessaires pour respecter la demande totale. Le taux de remplissage moyen des camions est de  $65,4 \text{ m}^3$ .



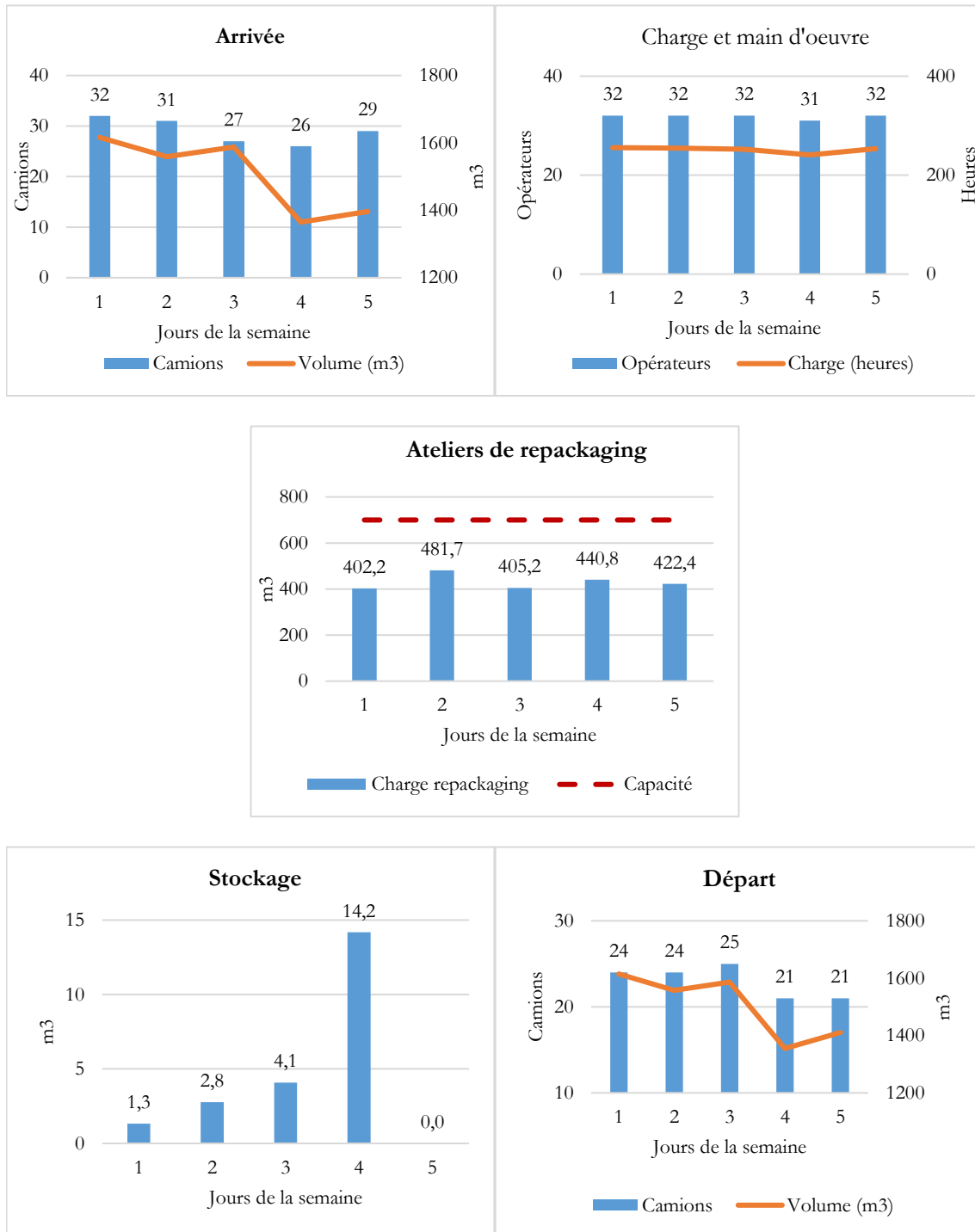


Figure 26. Analyse détaillée des résultats de l'approche proposée, pour la semaine 2 de la plateforme # 2

## 7. Conclusion partie II

Dans cette deuxième partie de la thèse nous proposons une approche pour traiter le problème de transbordement dans un réseau logistique avec un centre de crossdock. En amont, les produits sont ramassés par des circuits de transport préétablis, qui peuvent comporter un ou plusieurs fournisseurs. Ces circuits sont définis par un nombre de camions, une fréquence de passage et une capacité maximale par camion. En interne, nous considérons des opérations de repackaging et une zone de stockage temporaire, avec des capacités maximales par jour. En aval, le seul paramètre lié aux camions à destination des clients est sa capacité. Les produits sont caractérisés par leur volume et leur poids. Les capacités et la charge de travail sont définies en accord avec ces caractéristiques. Malgré des hypothèses issues principalement de notre cas d'étude, nous considérons que cette configuration peut convenir ou être adaptée à un ensemble de problèmes dans d'autres industries. Nous développons un modèle en programmation linéaire en nombres entiers qui vise à minimiser le coût total. En amont, les inducteurs de coûts sont le nombre de camions et des pénalités liées à l'utilisation des camions non prévus dans le plan préétabli. En interne, des coûts de stockage et de main d'œuvre sont considérés. Finalement, en aval, le coût est caractérisé par le nombre de camions.

Les travaux de recherche analysés intègrent un certain nombre de caractéristiques, mais ne répondent pas totalement à la problématique que nous avons décrite. En particulier, le fait d'inclure des opérations de repackaging et un dimensionnement de la main d'œuvre sur la base des temps d'opérations, sont deux aspects qui ne sont pas pris en compte dans la littérature que nous avons étudiée. Le modèle proposé est implémenté et testé avec CPLEX, sur des instances basées sur des données réelles de deux plateformes Renault. D'une part, les résultats ont montré que l'approche proposée permet de réduire le coût total vis-à-vis de la méthode Renault. D'autre part, notre approche permet de synchroniser les flux entrants et sortants du centre de crossdock, tout en incluant des contraintes et des objectifs sur les opérations de l'atelier.

Suite aux expérimentations, le principal axe d'amélioration identifié est l'analyse des tournées de véhicules en amont de la plateforme. D'abord, une étude du plan du transport actuelle s'avère nécessaire, pour établir s'il est bien adapté à la volumétrie liée à chaque fournisseur. Il est possible que cette volumétrie varie beaucoup d'une semaine à l'autre, il serait donc pertinent d'inclure la définition des tournées de véhicules dans la planification hebdomadaire. Sur la base des configurations d'autres plateformes logistiques Renault et de crossdock dans d'autres industries, nous adressons les perspectives suivantes : (1) en amont, l'inducteur de coûts peut être différent au nombre de camions. Une caractérisation du coût avec une partie fixe (passage de commande) et une partie variable (liée à la volumétrie) serait aussi pertinente. (2) En interne, une contrainte sur la charge maximale de travail pourrait être incluse, si l'inducteur de coût n'est pas lié au dimensionnement de la main d'œuvre. (3) En aval, des contraintes sur les temps de départ, voire des tournées de véhicules pourraient être étudiées.



### **III. Ordonnancement des activités dans un centre de crossdock**

<b>8. Description du problème</b> .....	<b>94</b>
8.1. Hypothèses.....	94
8.2. Caractérisation du problème et comparaison avec la littérature analysée.....	96
8.3. Données d'entrée.....	98
<b>9. Modélisation proposée</b> .....	<b>100</b>
9.1. Variables de décision.....	100
9.2. Formulation mathématique : programmation linéaire en nombres entiers.....	100
9.3. Expérimentations et résultats.....	102
<b>10. Conclusion partie III</b> .....	<b>109</b>

## 8. Description du problème

Nous traitons la problématique d’ordonnancement des camions et des opérations. Les décisions principales comprennent les temps d’arrivée et de départ des camions, l’affectation des produits aux camions et les flux d’emballages entre les zones de l’atelier. L’objectif est de respecter au maximum les temps d’arrivée prédéfinis pour les circuits en amont. Pour rappel, la Figure 21 positionne ce problème par rapport au niveau décisionnel. La Figure 27 présente en détail la description du problème et permet de faire la comparaison avec les approches industrielles de Renault et de Nissan, présentés dans la Section 2.4.

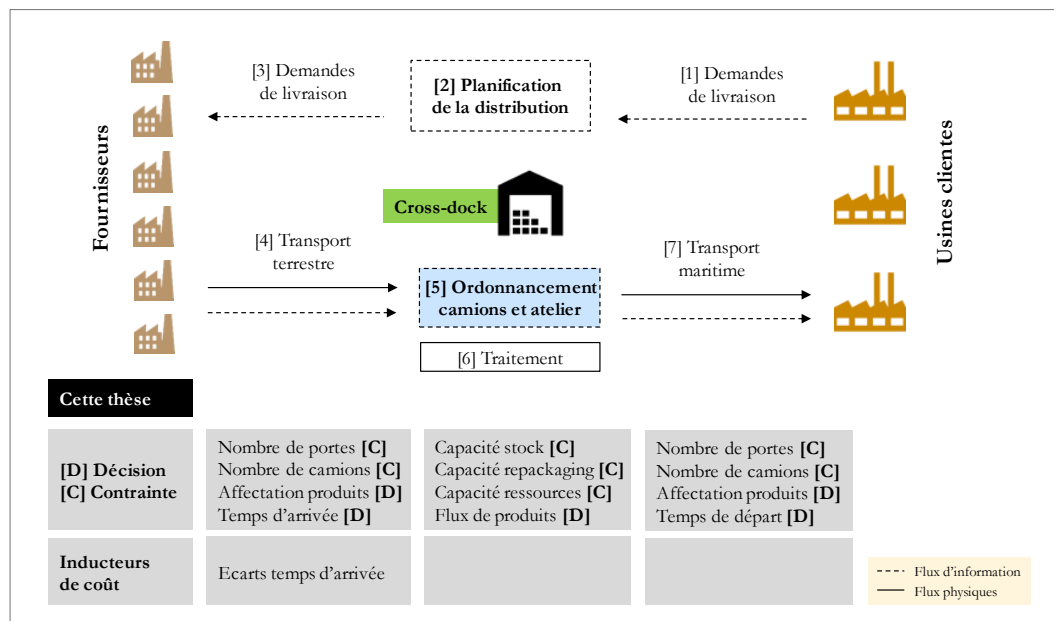


Figure 27. Ordonnancement de camions et des opérations dans l’atelier dans un centre de crossdock. Caractérisation de l’approche proposée dans cette thèse

Dans l’atelier, quatre zones sont modélisées : la réception (déchargement de camions), le repackaging, le stock temporaire et l’expédition (chargement de camions). Des capacités liées à chaque opération sont définies : en réception, le nombre de portes disponibles ; en interne, les capacités de l’atelier de repackaging, de la zone de stockage et de la main d’œuvre ; en expédition, le nombre de portes disponibles. Les camions en amont et en aval ont également des capacités maximales liées à une dimension (*métrage linéaire*).

### 8.1. Hypothèses

L’horizon de planification est d’une journée, avec des tranches de travail (par exemple d’une heure). Les demandes client de composants sont connues et doivent être respectées pour la fin de l’horizon de planification. Il peut y avoir du stock au début et à la fin de l’horizon. Chaque composant est produit par un seul fournisseur et cette donnée est connue. D’autres informations données pour chaque composant sont : la référence, les dimensions de l’emballage

(et donc le volume en m<sup>3</sup>), la place occupée dans un camion (*métrage linéaire*), le type d'opération à subir pendant le transit par la plateforme crossdock et le type de produit correspondant. Un type de produit donné regroupe tous les composants livrés dans le même circuit de transport amont, avec le même métrage linéaire, le même volume (m<sup>3</sup>) et le même type d'opération dans l'atelier. Les composants ayant ces quatre caractéristiques communes sont interchangeables, d'une part, dans la définition des contenus des camions en amont (du même circuit et avec le même métrage linéaire), mais aussi dans les opérations dans l'atelier (même m<sup>3</sup> et même opération). Le Tableau 26 montre plusieurs exemples de ce processus d'agrégation. La notion du client n'est pas incluse dans cette agrégation, car les demandes sont définies par composant. Une contrainte est définie dans ce sens, permettant de respecter les demandes client de composants. Ceci permet également de définir le chargement de camions en aval, en utilisant le type de produit (même métrage linéaire).

Composant	Fournisseur	Circuit	Volume (m3)	Métrage linéaire (m)	Type d'opération	Type produit
A	F1	C1	1,41	0,24	Direct	P1
B	F2	C1	1,41	0,24	Direct	P1
C	F2	C1	0,06	0,03	Groupement	P2
D	F3	C2	1,41	0,24	Direct	P3
E	F4	C3	0,74	0,45	Conditionnement	P4
F	F5	C3	1,11	0,53	Direct	P5
G	F5	C3	0,74	0,45	Conditionnement	P4

Tableau 26. Illustration sur le processus d'agrégation de composants en type de produits

En amont, l'on connaît le nombre de camions par circuit de transport qui seront réceptionnés au crossdock, ainsi que leur capacité maximale (en *métrage linéaire*). Un circuit de transport peut représenter un ou plusieurs fournisseurs et chaque circuit comporte une ou plusieurs périodes d'arrivée prédéfinies.

En interne, le nombre de portes utilisées pour la réception des camions est connu. Suite au déchargement, les colis qui vont faire l'objet du repackaging sont transportés aux ateliers concernés, où ils peuvent être stockés temporairement ou traités immédiatement. Deux types d'opérations sont considérés : le *groupement* des petits colis dans un emballage plus grand et (2) le changement ou la modification de l'emballage (*conditionnement*). Le reste de produits peut aller soit dans une zone de stockage temporaire, soit directement dans la zone de chargement, pour expédition. Suite au repackaging, qui dure une période de temps, les colis ont également ces deux possibilités : stockage temporaire ou expédition. La Figure 28 illustre cette description. Les capacités de stockage, de main d'œuvre et de l'atelier de repackaging sont connues. Finalement, le nombre de portes utilisées pour l'expédition de camions est donné.

En aval, l'on connaît le nombre de camions à utiliser pour chaque destination, ainsi que la capacité maximale (en *métrage linéaire*). Il n'y a pas d'autres contraintes sur le chargement de camions ni sur les temps de départ, car tous les camions se dirigent vers le port maritime.

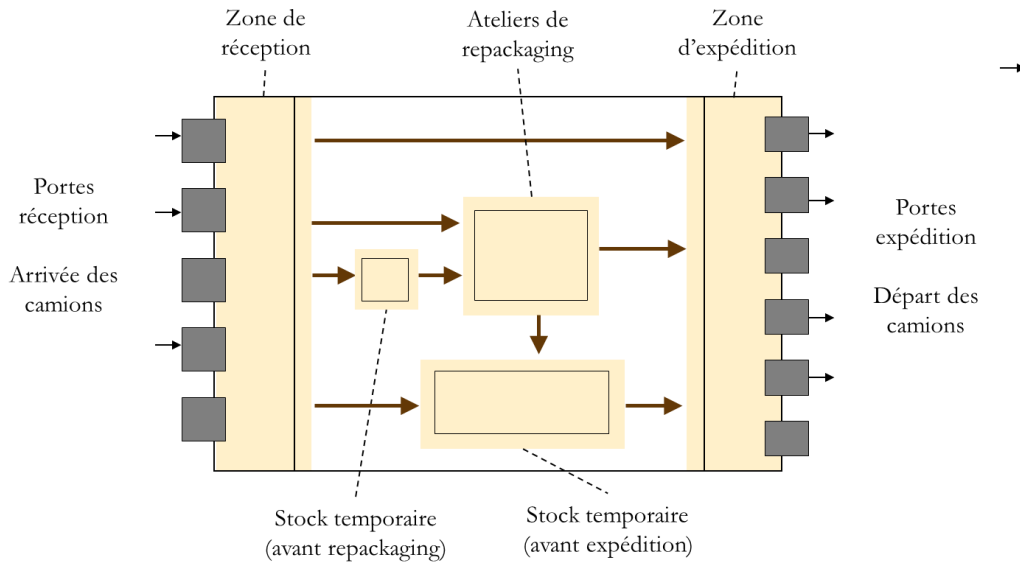


Figure 28. Zones et flux dans l'atelier du centre de crossdock considéré

## 8.2. Caractérisation du problème et comparaison avec la littérature analysée

Le Tableau 27 résume la configuration de la problématique traitée, sur la base de ce qui a été présenté dans la première partie de ce document. Il s'agit du problème d'ordonnancement de camions et de l'atelier dans un centre de crossdock avec du repackaging. Nous considérons un environnement de plusieurs portes (en entrée et en sortie) qui fonctionnent avec un mode de service exclusif. L'interruption du déchargement (ou chargement) des camions est interdite. Dans l'atelier, le stockage, les ressources et l'opération de repackaging ont des capacités limitées, représentant des contraintes fortes. Plusieurs types de produits sont considérés, conditionnés dans des emballages de dimensions diverses et la capacité des camions est définie en accord. Les temps d'arrivée des camions sont connus et représentent des contraintes souples. En revanche, il n'y a pas des contraintes liées aux temps de départ des camions. Un seul inducteur de coûts est considéré, lié aux pénalités associées aux temps d'arrivée des camions (par rapport à des temps prédéfinis). Finalement, la programmation linéaire en nombres entiers est utilisée pour la modélisation et la résolution du problème.

<b>Problème</b>	Ordonnancement	<b>Type de produits (emballages)</b>	Multi-produit (Diversifiés)
<b>Données réelles (industrie)</b>	Oui (Automobile)	<b>Affectation de produits (interchangeabilité)</b>	Destination (oui)
<b>Portes amont/aval</b>	>1 / >1	<b>Capacité camions</b>	Dimensionnelle
<b>Mode service</b>	Exclusif	<b>Temps d'arrivée</b>	Par camion
<b>Repackaging</b>	Oui	<b>Temps de départ</b>	Non
<b>Interruption</b>	Non	<b>Inducteurs de coûts</b>	Ecart temps d'arrivée
<b>Stockage</b>	Limité	<b>Méthodes de résolution</b>	PLNE
<b>Capacité traitement</b>	Limitée		

Tableau 27. Caractérisation du problème d'ordonnancement de camions et des opérations dans l'atelier dans un centre de crossdock, traité dans cette thèse

Sur les 23 articles analysés dans la Section 3.7., plus de la moitié considèrent des environnements mono-portes (1 porte en entrée et une porte en sortie). 1 seul article fait l'hypothèse d'un mode de service combiné. Uniquement 3 travaux présentent des cas d'études industriels et deux d'entre eux utilisent des données réelles dans les expérimentations. Le repackaging des produits est considéré dans deux travaux : Bolori Arabani, Zandieh, et al. (2011) incluent une opération de dé-palettisation et de ré-palettisation, mais cela ne se voit pas clairement décrit dans leur modélisation ; Fanti et al. (2016) considèrent des opérations similaires et incluent dans leur modèle des variables d'affectation des emballages dé-palettisés suite au déchargement aux palettes pour expédition (qui doivent être mono-produit). L'interruption des opérations de chargement/déchargement est autorisée seulement dans trois articles. Concernant les capacités internes, la politique de zéro stockage est considérée par cinq travaux. Cette contrainte est souvent associée à l'industrie agroalimentaire ou à des centres de crossdock automatisés. Deux articles utilisent une capacité limitée et le reste (16) une capacité illimitée. La plupart des travaux (21/23) considèrent la capacité des ressources internes étant illimitée, ce qui serait une simplification forte par rapport à notre cas industriel.

Seulement deux articles proposent des flux logistiques mono-produit, le reste considère des environnements multi-produits. En revanche, les travaux considérant des emballages équivalents pour tous les produits sont plus nombreux, 9 au total. Des crossdocks avec des emballages diversifiés sont modélisés dans 4 travaux. Pour le reste (10) cet aspect n'est pas clairement décrit. En termes d'affectation de produits, 5 articles considèrent le mode *destination*, ce qui est associé à une définition de la capacité des camions en nombre maximal de produits.



Seulement un article travaille avec une capacité dimensionnelle ; cette hypothèse est très importante dans notre étude, étant donné la diversité de types d’emballages présents dans les AILN. Le mode *post-destination* est considéré dans 11 travaux et le reste (7) utilisent le mode *pré-destination*. Par rapport aux temps d’arrivée, la plupart des travaux (16/23) considèrent que les camions sont disponibles à l’instant zéro. De même, seulement 9 sur 23 incluent des contraintes sur les temps de départ des camions. En termes d’inducteurs de coûts, la minimisation du *makespan* reste l’objectif principal, considéré dans 11 travaux. Le stockage est inclus dans 8 articles et nous retrouvons d’autres inducteurs comme l’écart des temps de départ (pénalités) et le lissage de charge. En termes de méthodes de résolution, les approches heuristiques (18 articles) et la programmation linéaire (12 articles) sont les plus utilisées.

### 8.3. Données d’entrée

Ci-dessous nous décrivons les indices utilisés dans la modélisation et les paramètres liés aux composants et à chaque zone de l’atelier : réception, opérations internes, expédition.

#### Indices

$a \in A$  Opérations dans l’atelier (1 : direct, 2 : groupement, 3 : conditionnement)

$c \in C$  Composants.

$i \in I$  Types de produits

$k \in K$  Destinations (clients).

$l \in L$  Origines (circuits de transport).

$m \in M$  Camions en amont.

$n \in N$  Camions en aval.

$t \in T$  Périodes de temps (par exemple heures).

#### Paramètres composants

$q_{c,l}$  Quantité du composant  $c$  qui sera livrée dans le circuit  $l$ .

$q_{0,c,k}$  Quantité du composant  $c$  demandé par le client  $k$ .

$tp_{c,i}$  1 si le composant  $c$  appartient au type de produit  $i$ , 0 sinon.

#### Paramètres type produits

$v_i$  Volume ( $m^3$ ) du produit  $i$ .

$m_c$  Métrage linéaire (m) du produit  $i$  (place occupée dans le camion).

$r_{i,a}$  1 si le produit  $i$  est concerné par l’opération  $a$ , 0 sinon.

**Paramètres réception**

- $vit$  Capacité maximale (en m) d'un camion (transport amont).
- $itl_{m,l}$  1 si le camion amont  $m$  appartient au circuit  $l$ .
- $trd_{l,t}$  1 si la période d'arrivée  $t$  fait partie des périodes contractualisées du circuit  $l$ , 0 sinon.
- $cpc$  Pénalité liée au non-respect des périodes d'arrivée contractualisées.
- $ind$  Nombre de portes en réception (déchargement de camions amont).
- $wit$  Temps de réception d'un camion amont.
- $M$  Grand nombre.

**Paramètres internes**

- $wun$  Temps de déchargement d'emballages (par  $m^3$ ).
- $wst$  Temps (par  $m^3$ ) de l'opération de stockage.
- $wre_a$  Temps (par  $m^3$ ) de l'opération  $a$ .
- $wlo$  Temps de chargement d'emballages (par  $m^3$ ).
- $wd$  Temps total travaillé par période de temps (par un opérateur).
- $sm$  Capacité maximale ( $m^3$  par période de temps) de la zone de stockage.
- $rep$  Capacité maximale ( $m^3$  par période de temps) des ateliers de repackaging.
- $wf$  Main d'œuvre disponible dans le centre de crossdock (en nombre d'opérateurs).

**Paramètres expédition**

- $vot$  Capacité maximale (en m) d'un camion (transport aval).
- $otd_{n,k}$  1 si le camion aval  $n$  est en destination du client  $k$ .
- $ond$  Nombre de portes en expédition (chargement de camions aval).
- $wot$  Temps d'expédition d'un camion aval.

## 9. Modélisation proposée

Ci-dessous nous décrivons les variables de décisions et la formulation mathématique du modèle, en utilisant la programmation linéaire en nombres entiers.

### 9.1. Variables de décision

- $IT_{m,t}$  1 si le camion amont  $m$  arrive en période  $t$ , 0 sinon.
- $F_m$  1 si le camion amont  $m$  arrive dans une période contractualisée, 0 sinon.
- $X1_{c,m}$  Quantité du composant  $c$  livrée dans le camion amont  $m$ .
- $X2_{i,m,t}$  Quantité du produit  $i$  livrée dans le camion amont  $m$  en période  $t$ .
- $SR_{i,t}$  Quantité du produit  $i$  stockée en période  $t$  (stockage avant repackaging).
- $SE_{i,t}$  Quantité du produit  $i$  stockée en période  $t$  (stockage avant expédition).
- $R_{i,t}$  Quantité du produit  $i$  en repackaging en période  $t$ .
- $Y1_{c,n}$  Quantité du composant  $c$  expédiée dans le camion aval  $n$ .
- $Y2_{i,n,t}$  Quantité du produit  $i$  expédiée dans le camion aval  $n$  en période  $t$ .
- $OT_{n,t}$  1 si le camion aval  $n$  parte en période  $t$ , 0 sinon.

### 9.2. Formulation mathématique : programmation linéaire en nombres entiers

La fonction objectif et les contraintes associées sont présentées ci-dessous :

$$\text{Min } Z = \text{cpc} * \sum_m (1 - F_m) \quad (1)$$

#### Contraintes :

$$F_m \leq \sum_{l,t} \text{itl}_{m,l} * IT_{m,t} * \text{trdl}_{l,t} \quad \forall m \quad (2)$$

$$\sum_t IT_{m,t} = 1 \quad \forall m \quad (3)$$

$$\sum_m IT_{m,t} \leq \text{ind} \quad \forall t \quad (4)$$

$$X2_{i,m,t} \leq M * IT_{m,t} \quad \forall i,m,t \quad (5)$$

$$X2_{i,m,t} \leq \sum_c (X1_{c,m} * \text{tp}_{c,i}) \quad \forall i,m,t \quad (6)$$

$$X2_{i,m,t} \geq \sum_c (X1_{c,m} * \text{tp}_{c,i}) - M * IT_{m,t} \quad \forall i,m,t \quad (7)$$

$$\sum_m X1_{c,m} * \text{itl}_{m,l} = \text{qi}_{c,l} \quad \forall c,l \quad (8)$$

$$\sum_{i,t} (X2_{i,m,t} * m_i) \leq \text{vit} \quad \forall m \quad (9)$$

$$R_{i,t} = \left( \sum_m X2_{i,m,t} * \sum_{a'=[2,3]} r_{i,a'} \right) - SR_{i,t} \quad \forall i,t=1 \quad (10)$$

$$R_{i,t} = \left( \sum_m X2_{i,m,t} * \sum_{a'=[2,3]} r_{i,a'} \right) - SR_{i,t} + SR_{i,t-1} \quad \forall i,t>1 \quad (11)$$

$$\sum_t R_{i,t} = \sum_{c,l} q_{i,c,l} * tp_{c,i} * \sum_{a' = [2,3]} r_{i,a'} \quad \forall i \quad (12)$$

$$SE_{i,t} = \sum_m X2_{i,m,t} - R_{i,t} - \sum_n Y2_{i,n,t} \quad \forall i,t=1 \quad (13)$$

$$SE_{i,t} = SE_{i,t-1} + R_{i,t-1} + \sum_m X2_{i,m,t} - R_{i,t} - \sum_n Y2_{i,n,t} \quad \forall i,t>1 \quad (14)$$

$$\sum_i (SE_{i,t} + SR_{i,t}) * v_i \leq sm \quad \forall t \quad (15)$$

$$\sum_i R_{i,t} * v_i \leq rep \quad \forall t \quad (16)$$

$$\begin{aligned} & \sum_m (IT_{m,t} * wit) \\ & + \sum_i [v_i * (\sum_m (X2_{i,m,t} * wun) \\ & + \sum_a (r_{i,a} * R_{i,t} * wre_a)) \\ & + (v_i * (SE_{i,t} + SR_{i,t}) * wst \\ & + \sum_n (Y2_{i,n,t} * wlo))] \\ & + \sum_k (OT_{k,t} * wot) \leq wf * wd \quad \forall t \quad (17) \end{aligned}$$

$$\sum_t OT_{n,t} = 1 \quad \forall n \quad (18)$$

$$\sum_n OT_{n,t} \leq oud \quad \forall t \quad (19)$$

$$Y2_{i,n,t} \leq M * OT_{n,t} \quad \forall i,n,t \quad (20)$$

$$Y2_{i,n,t} \leq \sum_c (Y1_{c,k} * tp_{c,i}) \quad \forall i,n,t \quad (21)$$

$$Y2_{i,n,t} \geq \sum_c (Y1_{c,k} * tp_{c,i}) - M * OT_{n,t} \quad \forall i,n,t \quad (22)$$

$$\sum_n Y1_{c,n} * otd_{n,k} = qo_{c,k} \quad \forall c,k \quad (23)$$

$$\sum_{i,t} (Y2_{i,n,t} * m_i) \leq vot \quad \forall n \quad (24)$$

$$X1_{c,m} ; X2_{i,m,t} ; Y1_{c,n} ; Y2_{i,n,t} \in \mathbb{N} \quad \forall c,i,m,n,t \quad (25)$$

$$SE_{i,t} ; SR_{i,t} ; R_{i,t} ; F_m \in \mathbb{N} \quad \forall i,m,t \quad (26)$$

$$IT_{m,t} ; OT_{n,t} \in \{0,1\} \quad \forall m,n,t \quad (27)$$

La fonction objectif en (1) cherche à minimiser le coût de pénalité lié à la non-utilisation des périodes contractualisées pour l'arrivée des camions amont. Les contraintes relatives à l'activité amont sont représentées par les équations (2) à (9). L'équation (2) représente, pour chaque camion amont, si la période d'arrivée correspond (ou pas) à une période contractualisée. La contrainte (3) assure que tous les camions sont réceptionnés dans le crossdock. Le respect du nombre de portes en entrée est assuré par la contrainte (4). Les équations (5) à (7) représentent les relations qui garantissent la cohérence entre les variables d'arrivée des composants (X1), d'arrivée des camions (IT) et d'agrégation des composants par type de produit (X2). La contrainte (8) assure le respect des livraisons de la totalité de composants. La capacité des camions amont est prise en compte dans (9). Les contraintes liées aux opérations internes sont représentées dans les équations (10) à (17) : les contraintes (10) et (11) représentent les flux

entre l'arrivée, la zone de stockage temporaire avant le repackaging et les ateliers de repackaging. L'équation (12) assure que tous les colis qui nécessitent du repackaging sont envoyés aux ateliers dans l'horizon de planification. Les contraintes (13) et (14) visent à équilibrer les flux et le stockage des produits : le niveau de stock de la période en cours correspond au niveau de la période précédente, plus la quantité reçue, plus la quantité qui est passé par le repackaging la période précédente, moins la quantité expédiée. Les équations (15) à (17) représentent, respectivement, les capacités de la zone de stockage, des ateliers de repackaging et des ressources internes. L'activité aval est contrainte par les équations (18) à (24). La contrainte (18) assure que tous les camions sont expédiés. Le respect du nombre de portes en sortie est assuré par la contrainte (19). Les équations (20) à (22) représentent les relations qui garantissent la cohérence entre les variables d'expédition des composants (Y1), de départ des camions (OT) et d'agrégation des composants par type de produit (Y2). La contrainte (23) assure le respect des demandes client de composants. La capacité des camions aval est prise en compte dans (24). Finalement, les équations (25) et (26) sont des contraintes sur les variables en nombres entiers et l'équation (27) sur les variables binaires.

### 9.3. Expérimentations et résultats

Dans cette section nous présentons la méthodologie utilisée pour la génération des instances, les expérimentations menées et l'analyse des résultats.

#### 9.3.1. Génération et caractéristiques des instances testées

Nous avons réutilisé une partie des instances utilisées dans la Section 6.3.1, afin d'initialiser la plupart de paramètres décrits dans la Section 8.3. Les résultats des expérimentations (Section 6.3.2 et Section 6.3.2) ont servi à initialiser les paramètres suivants : le nombre total de camions à utiliser (en amont et en aval), les composants à recevoir et à expédier par jour. Le Tableau 28 présente les différentes instances générées à partir des données collectées. Sur la plateforme #1, le nombre de composants à traiter par jour varient de 264 à 603, agrégés en une soixantaine de types de produit. En amont, le nombre de camions est dans l'intervalle de 14 à 22, regroupant une quinzaine de circuits. En aval, jusqu'à 9 destinations sont desservies avec une moyenne de 15 conteneurs par jour. En termes de volumétrie, le jour le plus chargé représente 1156 m<sup>3</sup> et le moins chargé 620 m<sup>3</sup>. L'activité de repackaging représente, en moyenne, 8% du volume total journalier. Finalement, le nombre total de colis traité par jour varie de 1030 à 3606. Concernant la plateforme # 2, la volumétrie est environ 70% supérieure à celle de la plateforme # 1, avec une activité de repackaging représentant presque 30% du volume total journalier. En revanche, le nombre moyen de colis traités par jour est à peine 45% supérieur à la moyenne de la plateforme # 1. L'écart du nombre de composants traités est encore moins important. En revanche, le nombre de types de produits par jour est inférieur à celui de la plateforme # 1 (53 en moyenne, contre 62). En amont, une trentaine de camions est réceptionné par jour, en

provenance d'ensemble de points d'origine qui varient de 13 à 27. Finalement, en aval, de 4 à 6 destinations sont desservies avec 24 conteneurs environ par jour.

Plateforme # 1						
Périodes de temps [T] = 7						
Instance (jour)	Composants [C] / Types de produits [I]	Origines [L] / Camions amont [M]	Destinations [K] / Camions aval [N]	Nombre total de composants	Volume total (m <sup>3</sup> )	Volume repackaging (m <sup>3</sup> )
1	345 / 72	17 / 22	7 / 16	1974	915,50	47,10
2	264 / 52	11 / 16	6 / 13	2198	805,02	55,02
3	439 / 70	16 / 19	7 / 16	2326	893,90	34,43
4	285 / 56	11 / 14	8 / 11	1789	620,40	76,11
5	603 / 66	11 / 16	8 / 14	3606	799,80	96,13
6	221 / 60	14 / 21	6 / 20	1030	1156,99	16,93
7	277 / 52	14 / 20	7 / 16	1274	1015,33	39,76
8	468 / 66	14 / 20	9 / 16	2393	906,33	62,67
9	282 / 58	15 / 18	8 / 12	1196	697,14	77,67
10	291 / 69	15 / 16	9 / 14	2611	734,72	100,64

Plateforme # 2						
Périodes de temps [T] = 8						
Instance (jour)	Composants [C] / Types de produits [I]	Origines [L] / Camions amont [M]	Destinations [K] / Camions aval [N]	Nombre total de composants	Volume total (m <sup>3</sup> )	Volume repackaging (m <sup>3</sup> )
1	372 / 57	15 / 31	6 / 26	2146	1607,77	483,95
2	587 / 55	20 / 41	6 / 34	4398	2088,34	471,94
3	434 / 46	16 / 30	4 / 23	1883	1469,16	445,92
4	452 / 48	16 / 30	6 / 24	3146	1485,16	470,47
5	439 / 47	17 / 28	6 / 21	2674	1317,60	483,45
6	350 / 50	13 / 24	6 / 20	1758	1212,22	384,07
7	636 / 54	27 / 42	6 / 33	6541	2081,79	322,28
8	496 / 59	23 / 33	6 / 23	2704	1439,96	380,65
9	460 / 57	13 / 25	6 / 21	2759	1306,43	371,91
10	397 / 58	15 / 24	4 / 19	1732	1218,48	354,26

Tableau 28. Taille des instances utilisées pour les expérimentations dans la Partie III

Le Tableau 29 présente les capacités des moyens de transport dans le réseau logistique et les capacités du crossdock. Les capacités des camions restent inchangées, mais les capacités de la zone de stockage et des ateliers de repackaging sont données par heure (et non pas par jour). Concernant la capacité des ressources internes, nous avons choisi des valeurs sur la base des

résultats des expérimentations de la Section 6.3. Nous listons également les valeurs relatives aux nombres de portes dans le crossdocks, pour les activités de réception et d'expédition.

Plateforme # 1			Plateforme # 2		
Paramètre	Description	Capacité	Paramètre	Description	Capacité
vit	Camions amont	13,2 [m]	vit	Camions amont	13,0 [m]
ind	Portes réception	7 [portes]	ind	Portes réception	10 [portes]
sm	Zone stockage	125 [m <sup>3</sup> / heure]	sm	Zone stockage	200 [m <sup>3</sup> / heure]
rep	Ateliers repackaging	20 [m <sup>3</sup> / heure]	rep	Ateliers repackaging	100 [m <sup>3</sup> / heure]
wf	Main d'œuvre	22 à 35 [opérateurs]	wf	Main d'œuvre	60 à 75 [opérateurs]
oud	Portes expédition	5 [portes]	oud	Portes expédition	7 [portes]
vot	Camions aval	12 [m]	vot	Camions aval	12 [m]
cpc	Pénalité période contractualisée	40	cpc	Pénalité période contractualisée	30

Tableau 29. Paramètres liés aux capacités du réseau logistique, aux capacités internes et à l'inducteur de coût des plateformes crossdock étudiées dans la Partie III

Finalement, le Tableau 30 montre la charge de travail associée à chaque opération réalisée dans l'atelier du crossdock (mêmes valeurs que celles présentées dans Section 6.3.1.).

Paramètre	Description	Valeur
wit	Réception camion	17,0 [min]
wun	Déchargement emballage	3,4 [min/m <sup>3</sup> ]
wst	Stockage emballage	0,7 [min/m <sup>3</sup> ]
wre <sub>a</sub>	Traitement emballage	0 / 18,7 / 53,1 [min/m <sup>3</sup> ]
wlo	Chargement emballage	2,6 [min/m <sup>3</sup> ]
wot	Expédition camion	20,0 [min]
wd	Temps de travail	420-480 [min]

Tableau 30. Paramètres liés à la charge de travail dans l'atelier des crossdocks étudiées dans la Partie III

### 9.3.2. Expérimentations et analyse des résultats

Nous avons utilisé CPLEX pour l'implémentation et la résolution du modèle proposé, avec une CPU AMD A8-4500M @ 1.9GHz de 8GB RAM. Le Tableau 31 montre les statistiques des expérimentations, notamment le nombre de variables et de contraintes, ainsi que la solution (fonction objectif) et performance de CPLEX, en termes de temps de calcul. La taille des problèmes varie entre 18290 et 82038 pour le nombre de variables, et entre 31508 et 99788 pour le nombre de contraintes. Les instances générées pour la plateforme # 2 sont de taille plus

grande que celles de la plateforme # 1, principalement à cause d'un nombre de composants et d'un nombre de camions (amont et aval) plus importants, malgré un nombre plus faible de destinations et de types de produits.

Plateforme # 1										
Jours Statistiques	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Variables	34062	19523	34249	18290	33562	27849	24440	35138	22086	24895
Contraintes	59289	31508	58215	32149	47116	48204	39403	53366	40275	50060
Solution (FO)	40	0	0	0	0	80	0	40	0	0
CPU time (s)	1800	246	247	412	510	1800	701	1800	179	253
GAP (%)	100	ND	ND	ND	ND	100	ND	100	ND	ND

Plateforme # 2										
Jours Statistiques	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Variables	49051	78986	44064	46758	42307	34576	82038	56105	43897	38783
Contraintes	64947	87590	52603	56924	53841	47163	99788	80608	56280	55913
Solution (FO)	ND	ND	90	ND	ND	120	ND	ND	ND	ND
CPU time (s)	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800
GAP (%)	ND	ND	100	ND	ND	100	ND	ND	ND	ND

Tableau 31. Statistiques sur les expérimentations dans CPLEX pour la méthode proposée dans la Partie III

Des solutions ont été trouvées pour toutes les instances de la plateforme # 1. Pour six (2, 3, 4, 5 et 9) le temps de calcul est autour des cinq minutes et pour une des instances (7) ce temps à presque atteint les douze minutes. Dans tous ces cas, la fonction objectif est zéro, ce qui signifie que tous les camions amont seront arrivés dans des périodes contractualisées. En revanche, pour les instances 1, 6 et 8 CPLEX ne prouve pas l'optimalité de solution obtenue, après trente minutes de calcul. Logiquement, la fonction objectif est supérieure à zéro et des pénalités sur l'arrivée des camions sont générées. Ces résultats montrent la complexité du problème, ce qui est confirmé par les expérimentations des instances de la plateforme # 2, où CPLEX fournit des solutions uniquement pour deux des dix instances (3 et 6).

À la différence de ce que nous avons pu faire dans la Partie II, nous ne pouvons pas comparer les résultats de notre approche avec la méthode Renault, car actuellement il n'y a pas un ordonnancement à la maille horaire des opérations dans les AILN Renault. Dans l'atelier, les opérateurs traitent les emballages « au fil de l'eau », se basant sur la planification journalière qui a été réalisée. Ces opérations comprennent le stockage, le repackaging et l'affectation des emballages aux camions aval (conteneurs). En ce qui concerne l'affectation des composants aux camions amont, cette décision appartient aux fournisseurs, qui doivent s'assurer de respecter le



jour de livraison. Néanmoins, avec le travail sur le terrain que nous avons pu mener dans les AILN Renault, le modèle proposé représente une opportunité pour optimiser les flux internes de la plateforme. Afin de visualiser les résultats, une des instances a été analysée en détail. Ceci est présenté dans la section suivante.

#### 9.3.3. Illustrations des résultats sur une des instances

La Figure 29 présente les résultats globaux des expérimentations sur une des instances de la plateforme # 1. En arrivée, un total de 22 camions est réceptionné sur les 7 périodes de temps analysées, en respectant le nombre de portes disponibles (7). Dans l'atelier, la distribution de la charge n'est pas tout à fait lissée, avec un creux de 14 heures et un pic de 23,8 heures, pour une capacité maximale à respecter de 24 heures. Dans les ateliers de repackaging la charge est un peu mieux distribuée, avec une dernière période dans laquelle l'activité est nulle, car tous les colis doivent être expédiés pour la fin de l'horizon de planification, et cette opération est réalisée sur une période de temps. Les zones temporaires de stockage (avant repackaging et avant expédition) présentent un taux d'occupation est assez élevé, en particulier sur les périodes 3 à 6. Finalement, en expédition, 17 camions sont expédiés avec une concentration dans les 4 dernières périodes, avec un pic en période 7, en utilisant toutes les portes disponibles (5).

Pour avoir encore une vision plus précise de l'ordonnancement des opérations dans l'atelier, nous avons mis en forme des résultats détaillés pour chaque période de temps, comme présenté dans la Figure 30. Sur la période 2, deux camions sont réceptionnés contenant un volume total de  $37,5 \text{ m}^3$ , pour lesquels leur contenu (en composants) est fourni par la solution du modèle. Ce volume est distribué vers les zones de stockage temporaire (avant repackaging :  $19,0 \text{ m}^3$  ; avant expédition :  $13,9 \text{ m}^3$ ) et vers les ateliers de repackaging ( $4,6 \text{ m}^3$ ). Ces ateliers reçoivent également  $1,6 \text{ m}^3$  en provenance de la zone de stockage et donc la charge de la période totalise  $6,3 \text{ m}^3$ . Finalement, à partir des ateliers de repackaging  $8,6 \text{ m}^3$  sont envoyés vers la zone de stockage avant expédition. En aval, aucun camion n'est chargé, donc il n'y a pas des flux d'emballages vers cette zone. En bas à droite, l'on peut voir le niveau de stockage total et la charge de travail pour la période. Sur la période 3, suite aux flux entre les différentes zones (comme expliqué pour la période 2), 2 camions sont expédiés, consolidant  $96 \text{ m}^3$  au total, dont une partie en provenance directe de la réception ( $61 \text{ m}^3$ ), une partie en provenance des ateliers de repackaging ( $0,3 \text{ m}^3$ ) et un volume de  $34,6 \text{ m}^3$  en provenance de la zone de stockage temporaire. Pour ces camions, le contenu en termes de composants est également connu. Pour les flux définis en types de produits, un travail de désagrégation est fait pour retrouver leur définition par composant.

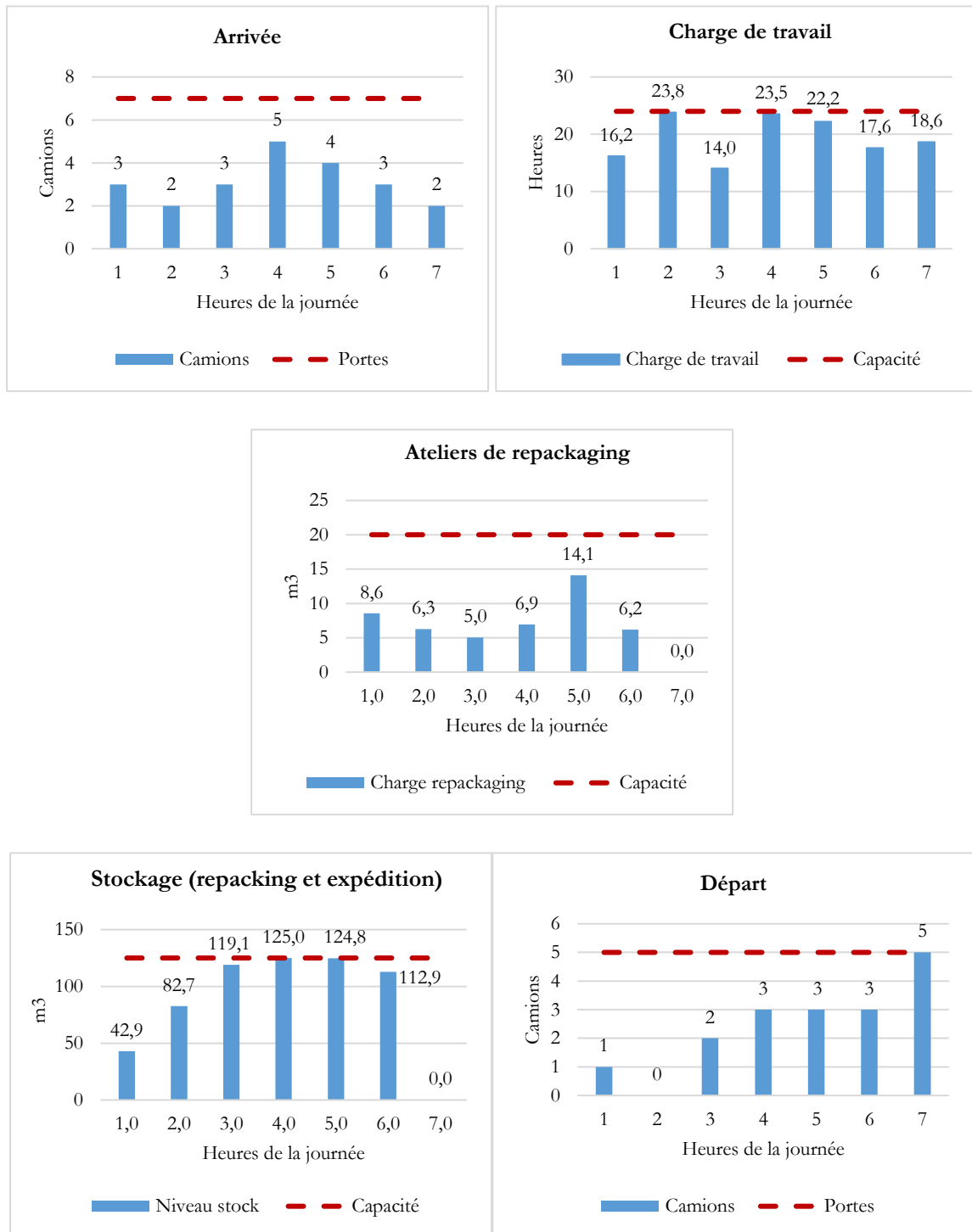


Figure 29. Analyse détaillée des résultats de l'approche proposée dans la Partie III

### III. Ordonnancement des activités dans un centre de crossdock

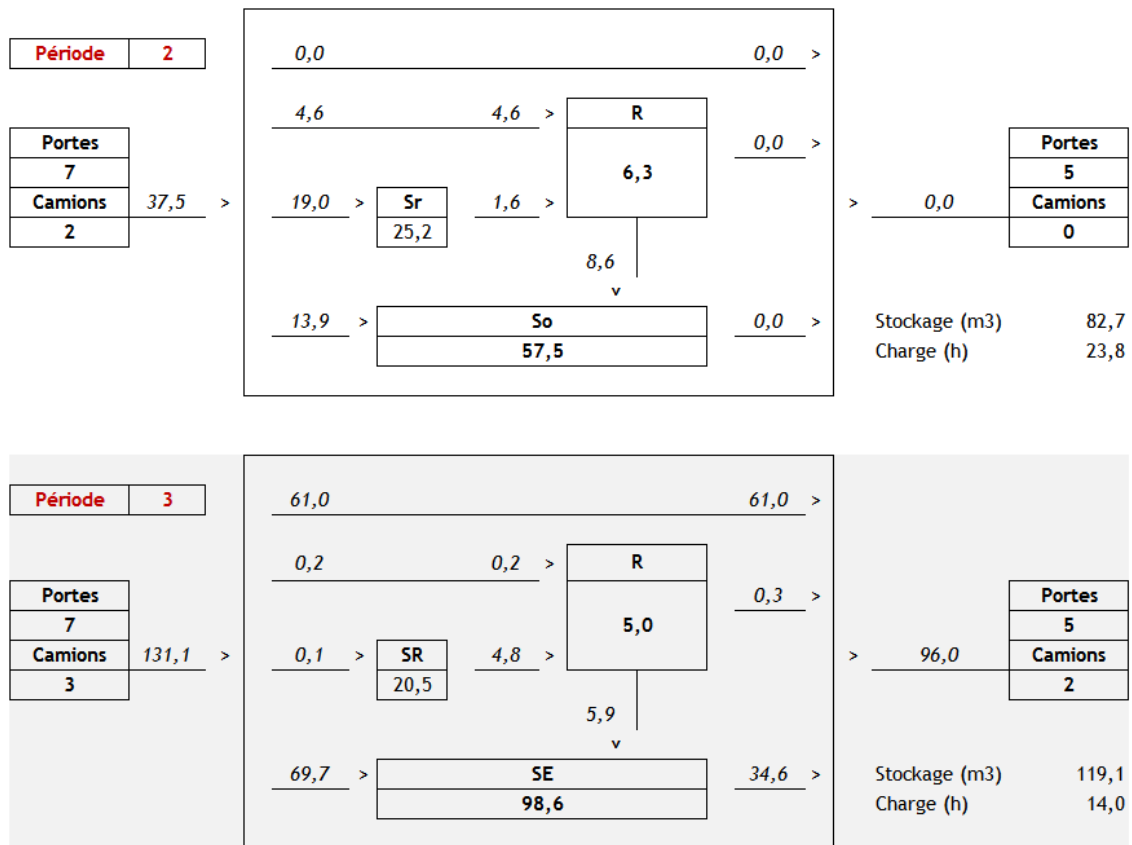


Figure 30. Analyse détaillée sur les résultats de l'approche proposée dans la Partie III.

## 10. Conclusion partie III

Cette partie de la thèse est focalisée sur le problème d'ordonnancement de camions et des opérations dans un crossdock. Nous proposons un modèle en programmation linéaire en nombres entiers pour définir les temps d'arrivée et de départ des camions, leur contenu et les flux des produits dans l'atelier. Dans notre cadre de recherche, ce modèle utilise une partie des résultats du modèle présenté dans la Partie II de ce document, afin d'initialiser un certain nombre de paramètres d'entrée, notamment le nombre de camions et les capacités du crossdock.

Une agrégation des composants en type de produits, est proposée pour pouvoir traiter des instances de taille réelle. En amont, l'on connaît l'ensemble de camions à utiliser et leur provenance, avec des temps d'arrivée contractualisées. En interne, le nombre de portes en réception et en expédition est limité. Nous considérons des opérations de repackaging et une zone de stockage temporaire avec des capacités maximales par période, ainsi qu'une main d'œuvre limitée. Suite au déchargement, les produits concernés par le repackaging vont directement aux ateliers et les produits n'étant pas concernés par cette opération peuvent aller directement en expédition ou passer à la zone de stockage temporaire. Une fois le repackaging fini, les produits peuvent aller soit à la zone de stockage, soit en zone d'expédition. À partir de la zone de stockage, les produits vont aller vers l'expédition. En aval, les nombres de camions par destination sont connus et il n'y a pas de contraintes particulières sur leur temps de départ.

Les travaux de recherche analysés intègrent une partie de nos hypothèses, mais aucun ne propose une solution pour notre problématique. D'abord, la plupart des articles considèrent que les contenus des camions en amont sont connus, tandis que notre modèle fait l'affectation des produits aux camions disponibles. Un autre point qui est peu traité est le fait de considérer une opération de repackaging. Nous utilisons CPLEX pour l'implémentation du modèle et menons des expérimentations sur la base des données réelles Renault. Les résultats montrent que le modèle s'avère pertinent pour l'ordonnancement des opérations du crossdock et que, conjointement avec le modèle développé dans la Partie II, il pourrait fournir une approche tactique-opérationnelle complète pour la planification dans un centre de crossdock. Il est applicable à la plateforme AILN # 1, mais à cause de la taille des instances de la plateforme AILN # 2, la plupart du temps CPLEX n'arrive pas à fournir des solutions dans des temps de calcul inférieurs à 30 minutes.

La priorité pour la suite de ce travail est d'analyser comment intégrer les modèles proposés dans la Parties II et la Partie III, en particulier sur le dimensionnement de la main d'œuvre, qui risque d'être sous-estimé dans le modèle tactique (Partie II), par rapport à l'ordonnancement à une maille plus fine (Partie III). Un autre levier d'amélioration que nous identifions est le développement de méthodes heuristiques pour que l'approche puisse être appliquée à des instances plus grandes, en particulier sur la plateforme AILN # 2.



## **IV. Mise en œuvre des modèles proposés**

<b>11. Tests opérationnels sur l'optimisation du transport amont avec CPLEX.....</b>	<b>112</b>
11.1. Adaptation du modèle en programmation linéaire en nombres entiers.....	112
11.2. Déroulement du test et analyse des résultats .....	113
<b>12. Outils Renault sur l'optimisation du chargement.....</b>	<b>118</b>
12.1. La recherche opérationnelle chez Renault.....	118
12.2. Algorithmes d'optimisation du chargement de camions et de conteneurs.....	119
12.3. Prototype d'optimisation du transport amont et du lissage de l'activité.....	120
<b>13. Modèles CPLEX et prototypes Renault : quelques perspectives .....</b>	<b>123</b>
13.1. Sur la planification des flux (Partie II) .....	123
13.2. Sur l'ordonnancement des activités (Partie III) .....	124
<b>14. Conclusion partie IV.....</b>	<b>126</b>

## 11. Tests opérationnels sur l'optimisation du transport amont avec CPLEX

Suite aux résultats des expérimentations du modèle présenté dans la Partie II, il a été décidé de lancer des tests opérationnels dans une des AILN Renault (plateforme AILN # 1). Ces tests se sont focalisés uniquement sur le segment amont des AILN, pour plusieurs raisons :

1. Les gains potentiels les plus significatifs concernaient le transport amont
2. Techniquement la modification du programme de réception dans le système d'information de l'AILN était relativement simple à faire.
3. L'impact sur les processus d'approvisionnement de l'AILN était faible.

Nous présentons par la suite les étapes de préparation des tests, ainsi que les résultats.

### 11.1. Adaptation du modèle en programmation linéaire en nombres entiers

La première étape du travail a été l'adaptation du modèle afin d'être utilisé uniquement pour l'optimisation du segment amont. Les hypothèses correspondent à celles établies dans la Section 5.1. Afin de traiter uniquement les décisions sur l'activité amont, le modèle a été simplifié ainsi :

- Données d'entrée :

#### Indices

$c \in C$  Composants.

$j \in J$  Périodes de temps (jours de la semaine [1,5]).

$k \in K$  Destinations (clients).

$l \in L$  Origines (circuits de transport).

#### Paramètres composants

$q_{c,k}$  Quantité du composant  $c$  demandé par le client  $k$ .

$v_c$  Volume (m<sup>3</sup>) du composant  $c$ .

$m_c$  Métrage linéaire (m) du composant  $c$  (place occupée dans le camion).

$i_{c,l}$  1 si le composant  $c$  est livré dans le circuit  $l$ , 0 sinon.

#### Paramètres amont

$p_{v,j}$  Nombre de camions à disposition pour le circuit  $l$ , le jour  $j$ .

$v_{it}$  Capacité maximale (en m) d'un camion (transport amont).

$ci_l$  Coût fixe d'un camion pour le circuit  $l$ .

$r_s$  Pénalité (ratio) générée par la demande d'un camion supplémentaire.

$M$  Grand nombre.

▪ **Variables de décision :**

$X_{c,j}$  Quantité du composant  $c$  à recevoir le jour  $j$ .

$IT_{j,l}$  Approximation du nombre de camions disponibles (prévus dans le plan transport) à utiliser le jour  $j$ , pour circuit  $l$ .

$ITS_{j,l}$  Approximation du nombre de camions supplémentaires à utiliser le jour  $j$ , pour le circuit  $l$ .

▪ **Fonction objectif (Transport amont) :**

$$\text{Min } Z = \sum_{j,l} \{ [ IT_{j,l} + ITS_{j,l} * (1+rs*0.01) ] * cit_l \} \quad (1)$$

▪ **Contraintes :**

$$\sum_j X_{c,j} = \sum_k q_{c,k} \quad \forall c \quad (2)$$

$$\sum_c X_{c,j} * it_{c,l} * v_c \leq (IT_{j,l} + ITS_{j,l}) * vit \quad \forall j,l \quad (3)$$

$$IT_{j,l} \leq pv_{j,l} \quad \forall j,l \quad (4)$$

$$ITS_{j,l} \leq M * pv_{j,l} \quad \forall j,l \quad (5)$$

$$X_{c,j} ; Y_{c,j,k} \in \mathbb{N} \quad \forall c,j,k \quad (6)$$

$$IT_{j,l} ; ITS_{j,l} \in \mathbb{N} \quad \forall j,l \quad (7)$$

La fonction objectif en (1) cherche le coût du transport amont, qui est caractérisé par le coût fixe par camion utilisé, ainsi que la pénalité associée à l'utilisation des camions supplémentaires. La contrainte (2) garantit que tous les produits demandés par les clients soient reçus. La capacité des camions est prise en compte dans (3). Les équations (4) et (5) représentent le plan transport préétabli, en termes du nombre de camions mis à disposition pour chaque circuit. L'équation (5) contraint utilisation de camions supplémentaires uniquement si les camions à disposition sont tous utilisés. Finalement, les équations (6) et (7) sont des contraintes sur les variables en nombres entiers.

## 11.2. Déroulement du test et analyse des résultats

Afin de minimiser l'impact sur la planification de l'AILN, un périmètre réduit d'une dizaine de fournisseurs a été choisi pour le test. Cela représente 15% du volume total hebdomadaire de l'AILN (environ 1000 m<sup>3</sup>) et environ 200 composants différents. Le préavis de passage commande est d'une semaine. Ainsi, chaque lundi, l'AILN envoie des demandes pour des livraisons du lundi au vendredi de la semaine suivante. Associés à ces fournisseurs, il y a six circuits directs (mono-fournisseur) et deux circuits de collectage (avec deux fournisseurs chacun). Le plan transport pour ces huit circuits compte 19 camions par semaine.



La Figure 31 présente les étapes du test, réalisées chaque lundi. Pour commencer, il faut faire des extractions à l'aide de l'outil Business Objects sur deux systèmes d'information : (1) le système d'information des AILN pour le programme de réception prévisionnel pour la semaine prochaine, pour les composants qui font partie du périmètre. (2) le système d'information de la documentation transport amont pour récupérer le plan transport des circuits concernés (camions disponibles par jour). Ces deux extractions constituent les données d'entrée principales de CPLEX. Le modèle va fournir un programme de réception optimisé qui servira de base pour la mise à jour du système d'information de l'AILN, à l'aide d'une Macro Excel. Cette procédure est à faire chaque lundi pendant la journée. Le calcul d'approvisionnement du lundi soir fait par le système d'information de l'AILN prendra en compte les modifications (forçage) que l'utilisateur aura fait et la demande de livraison envoyée aux fournisseurs correspondra aux résultats obtenus avec CPLEX. Une fois la semaine de livraison passée, il faut vérifier les résultats du transport amont. Cela consiste à analyser le nombre de camions réceptionnés, le volume associé et les taux de service des fournisseurs. Cette analyse permet d'établir les sources d'écart entre la demande de livraison et les livraisons réelles. Dans la section suivante nous présentons ce processus sur un exemple concret, ainsi que les résultats globaux du test.

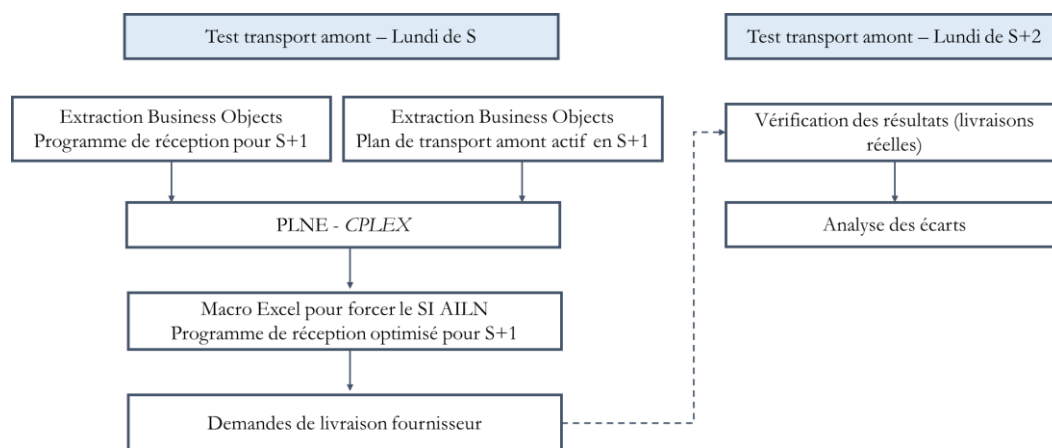


Figure 31. Procédure des tests opérationnels sur le transport amont

Comme expliqué précédemment, les extractions des données permettront d'analyser et de recalculer la demande de livraison des fournisseurs. Le Tableau 32 montre, pour un des circuits inclus dans le test, pour une semaine donnée, la comparaison entre la proposition du système d'information Renault et les résultats CPLEX de notre modèle. Le calcul du SI Renault se traduit par 4 camions au total (un le lundi, deux le mardi dont un camion supplémentaire et un le mercredi), ce qui se traduit par un taux de remplissage moyen de 40,6 m<sup>3</sup>. Le coût par camion pour ce circuit est de 700 euros et la pénalité pour l'utilisation des camions supplémentaires est de 30%. Le coût total pour la semaine est donc de 3010 euros. CPLEX fournit une solution comportant un camion de moins et donc un taux de remplissage de 54,1 m<sup>3</sup>. Le coût associé à cette solution est de 2100 euros, donc une dépense de 910 potentiellement évitée.

Circuit 1 - Fournisseur 1			Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi
SI AILN Renault	Volume (m3)	162,4	36,0	59,3	57,3		
	Nb camions	4		9,8			
	Tx remp. (m3)	40,6					
CPLEX (Commande envoyée)	Volume (m3)	162,4	58,5	50,6	53,3		
	Nb camions	3					
	Tx remp. (m3)	54,1					

Tableau 32. Exemple du test d'optimisation du transport amont pour un circuit avec un fournisseur, comparaison entre la méthode Renault et la méthode proposée

Pour constituer les camions et la volumétrie associée, il faut maintenant modifier le système Renault sur la base des résultats CPLEX. Ce processus doit être fait au niveau de la référence (composant), comme le montre le Tableau 33. Ce type de tableau était la base de la modification du système afin d'envoyer une demande de livraison optimisée aux fournisseurs. Ainsi, pour la première référence de la liste, au lieu de commander 1 emballage pour le lundi, le mardi et le mercredi, CPLEX propose d'en commander les trois pour la journée de mardi.

Référence	Fournisseur	Nombre d'emballages - SI AILN					Nombre d'emballages - CPLEX				
		L	M	M	J	V	L	M	M	J	V
651299910A	0067937701	1	1	1	0	0	0	3	0	0	0
651499978B	0067937701	0	2	0	0	0	0	2	0	0	0
651499905D	0067937701	3	3	2	0	0	5	3	0	0	0
656299922C	0067937701	2	1	1	0	0	0	0	4	0	0
766399915E	0067937701	6	0	0	0	0	6	0	0	0	0

Tableau 33. Illustration de la modification du programme de réception dans les tests opérationnels

La Figure 32 montre les livraisons réelles qui ont été effectuées par le circuit analysé dans l'exemple du Tableau 32. Le lundi, le circuit a livré une partie du volume demandé, à cause des problèmes de production chez le fournisseur. Mardi, la demande a été totalement respectée. Finalement, la livraison du mercredi a été retardée d'une journée, à cause d'un problème lié au transporteur. Cela fait un total de trois camions, avec un taux de remplissage moyen est de 52,7 m<sup>3</sup>. Le taux de service relatif à la semaine est de 97%, et celui relatif à la journée est de 67%. Suite à cette analyse, nous pouvons considérer que, grâce à l'optimisation de la commande, 910 euros de dépense ont été évités.

Circuit 1 - Fournisseur 1			Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi
SI AILN Renault	Volume (m3)	162,4	36,0	59,3	57,3		
	Nb camions	4		9,8			
	Tx rep. (m3)	40,6					
CPLEX (Commande envoyée)	Volume (m3)	162,4	58,5	50,6	53,3		
	Nb camions	3					
	Tx rep. (m3)	54,1					
REEL	Volume (m3)	158,2	54,3	50,6		53,3	
	Nb camions	3					
	Tx rep. (m3)	52,7					
	Tx service hebdo	97%					
	Tx service jour	67%					

Figure 32. Exemple du test d'optimisation du transport amont. Comparaison entre la méthode Renault, la méthode proposée et les résultats réels

Sur la base de ce que nous venons d'expliquer, la Figure 33 présente les résultats globaux des tests, en termes de coûts, menés sur 15 semaines. Trois courbes y sont présentées : (1) le coût estimé à partir du calcul du système d'information Renault, (2) le coût estimé suite à la simulation CPLEX et (3) le coût réel, obtenu suite aux analyses des livraisons réelles. Au total, autour de 50.000 euros de dépense ont été potentiellement évités, grâce au test opérationnel mené sur la base de notre approche.

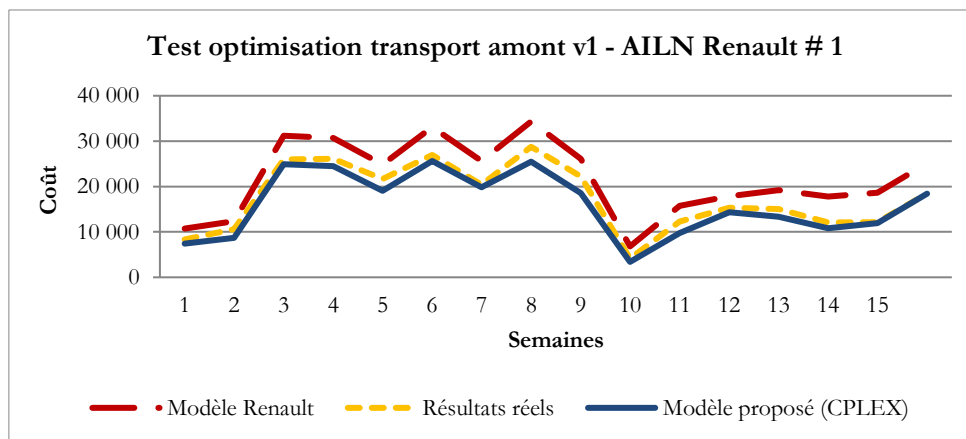


Figure 33. Synthèse des résultats du test sur le transport amont pour l'AILN Renault # 1, en utilisant CPLEX

L'écart entre le modèle proposée (et donc la commande envoyée aux fournisseurs) et les livraisons réelles, peut être causé par :

1. Des problèmes de production chez le fournisseur, qui se traduisent par l'indisponibilité de pièces au moment du passage du camion prévu. Si cela arrive, le fournisseur est censé organiser un transport, à sa charge, pour livrer ses pièces. Dans la pratique, s'il y a de la place dans un des camions des jours suivants, il l'utilise.

2. Des problèmes liés au transporteur, comme un camion en panne ou accidenté.
3. Une estimation inexacte du nombre de camions fournie par notre modèle. Pour rappel, cette estimation est faite sur la notion du *métrage linéaire*, qui permet d'estimer la place occupée par les emballages dans le camion. Nous avons eu le retour de certains fournisseurs indiquant que les emballages prévus dans la commande ne rentraient pas dans le camion.

Les deux premiers sujets sont des problèmes classiques rencontrés lors de l'approvisionnement des pièces. Ceci pourrait être intégré dans ce travail de recherche sous forme d'événements stochastiques et nous l'adressons comme une opportunité future de travail. En revanche, dans le cadre de notre étude, nous avons adressé le troisième sujet, en faisant une analyse des estimations du nombre de camions, en entrée et en sortie de la plateforme AILN. Pour le faire, nous nous sommes servis des outils disponibles chez Renault. Nous présentons par la suite ce travail.

## 12. Outils Renault sur l'optimisation du chargement

### 12.1. La recherche opérationnelle chez Renault

Depuis les années 1990, la recherche opérationnelle est utilisée chez Renault pour résoudre différents problèmes d'optimisation combinatoire, utilisant principalement le logiciel CPLEX. Un pôle recherche opérationnelle a été institué à la direction des Systèmes d'Information de Renault en 2003, avec des spécialistes sur le domaine, mais aussi avec des compétences en logistique, domaine d'application majeur des modèles. Ci-dessous nous décrivons brièvement quelques sujets de recherche qui ont abouti, d'une part, à des développements de logiciels et d'autre part à des communications scientifiques :

- La planification industrielle vise à déterminer les fabrications qui seront demandées aux usines, sur la base des prévisions de la direction du Marketing. Il faut prendre en compte plusieurs contraintes, dont la plus importante est celle de la capacité de production des usines. Afin de traiter les milliers de chiffres qui représentent ces prévisions par modèle, par version, par équipement lourd et proposer une planification mensuelle sur un horizon de deux ans, un algorithme de *goal programming* basé sur la programmation linéaire a été développé. Communication scientifique associée : Brenaut (2004).
- Ordonnancement de la production des chaînes de montage : le problème consiste à construire le « film véhicule » d'une journée de fabrication, c'est-à-dire trouver l'ordre idéal dans lequel les véhicules doivent être fabriqués, en intégrant des contraintes comme le fait d'avoir des rafales de véhicules de même couleur les plus longues possibles et des véhicules difficiles à assembler le plus espacés possible. L'équipe Renault a développé un algorithme de recuit simulé mais a également lancé un défi universitaire pour avoir d'autres types de solution. Publication scientifique associée : Solnon et al. (2008).
- Distribution des véhicules finis : cette activité est sous-traitée à des affréteurs, qui doivent faire appel à des flottes de camions, localisées dans différentes zones géographiques. Afin de défier les prix proposés par les affréteurs, l'équipe de l'ingénierie logistique du transport aval base sur les coûts d'une localisation et d'un dimensionnement optimaux des flottes disponibles, calculés à l'aide d'une modélisation qui se base sur la décomposition du problème en sous-problèmes traitables et une méthode de résolution basée sur la programmation linéaire et des heuristiques. Deux communications scientifiques sur ce sujet : Bricard (2006) et Nguyen & Brenaut (2011).
- Tournées de véhicules : nous avons décrit l'activité de conception du plan transport dans la Section 2.3.1. Pour rappel, sur la base des volumes prévisionnels il faut établir les parcours logistiques des fournisseurs. Il peut s'agir d'un transport direct,

en collectage ou en ramassage par un centre de groupage. Un algorithme heuristique a été développé, basé sur le regroupement des fournisseurs en clusters géographiques et l'exploration intensive de ces clusters pour construire les meilleures solutions. Communication scientifique associée : Nguyen (2012).

- Optimisation du chargement : expliquée en détails dans la section suivante.

## 12.2. Algorithmes d'optimisation du chargement de camions et de conteneurs

Une des fonctions des superviseurs transport est l'analyse des taux de remplissage des camions transportant les pièces des fournisseurs vers les sites Renault. Il s'agit d'optimiser la constitution des piles de palettes de pièces, et le placement de ces piles dans un camion. Pour ce faire, un algorithme heuristique avec une exploration arborescente à profondeur limitée a été développé, ainsi qu'un outil de visualisation 2D et 3D des plans de chargement. Plus récemment, l'algorithme a été adapté au chargement des conteneurs, opération qui inclut beaucoup plus de contraintes que le chargement de camions (diversité de types d'emballages plus importante, piles plus complexes, entre autres). Communications scientifiques associées : Nguyen & Brenaut (2013) et Bricard (2017).

Ces travaux ont abouti à des développements de deux prototypes de simulation de chargement, contenant les algorithmes décrits, ainsi qu'un module de visualisation. La Figure 34 décrit le fonctionnement de ces outils. Les données d'entrée principales sont la liste d'emballages à charger, accompagnée de leurs dimensions et poids, les capacités des camions à utiliser et des paramètres utilisateurs sur les constructions des piles, utilisés comme des contraintes supplémentaires à celles dans l'outil. Les contraintes principales concernent la capacité des camions et des conteneurs, tout comme des règles de gerbabilité des emballages. Des algorithmes heuristiques sur le chargement des camions et des conteneurs vont permettre de définir leur contenu et de présenter les résultats dans des fichiers Excel. Le module de visualisation 2D/3D permet à l'utilisateur d'analyser la configuration des piles et du chargement, tout comme faire un export PDF pour le partager avec les équipes opérationnelles.

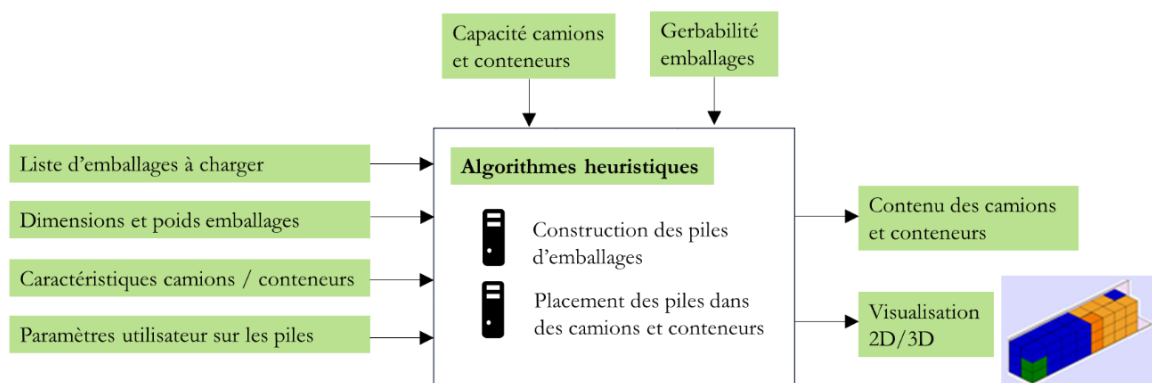


Figure 34. Fonctionnements des prototypes d'optimisation de chargement chez Renault

Le premier travail que nous avons effectué avec les outils d'optimisation de chargement a été d'évaluer les approximations sur le nombre de camions fourni par notre modèle. Nous nous sommes basés sur les résultats obtenus dans la Section 6.3. par l'approche proposée, pour la plateforme AILN # 1. Les résultats de l'évaluation des approximations sont présentés dans la Figure 35. En moyenne, en ce qui concerne le chargement des camions (transport amont), l'approximation obtenue avec l'outil d'optimisation est 13% au-dessus de l'approximation fournie par CPLEX. En aval, cette valeur est de 17% pour le chargement de conteneurs (transport aval). Comme expliqué précédemment, en aval des AILN la diversité d'emballages est beaucoup plus importante qu'en amont, ce qui fait que la construction des piles est plus complexe, d'où une approximation CPLEX qui est moins précise que pour le transport amont.

Les résultats de ce travail nous ont amené, d'un point de vue modélisation, à proposer une approche qui combine l'utilisation des modèles CPLEX et des outils d'optimisation de chargement. Ceci sera présenté dans le chapitre suivant.

D'un point de vue industriel, suite aux tests opérationnels présentés dans la Section 11.1., il a été décidé de développer un prototype pour continuer les tests. Sur la base du modèle CPLEX et en intégrant également des contraintes sur l'activité interne de l'AILN. Nous avons rédigé les spécifications de l'outil, suivi son développement et piloté sa mise en place dans l'AILN. Nous présentons ce travail dans la section suivante.

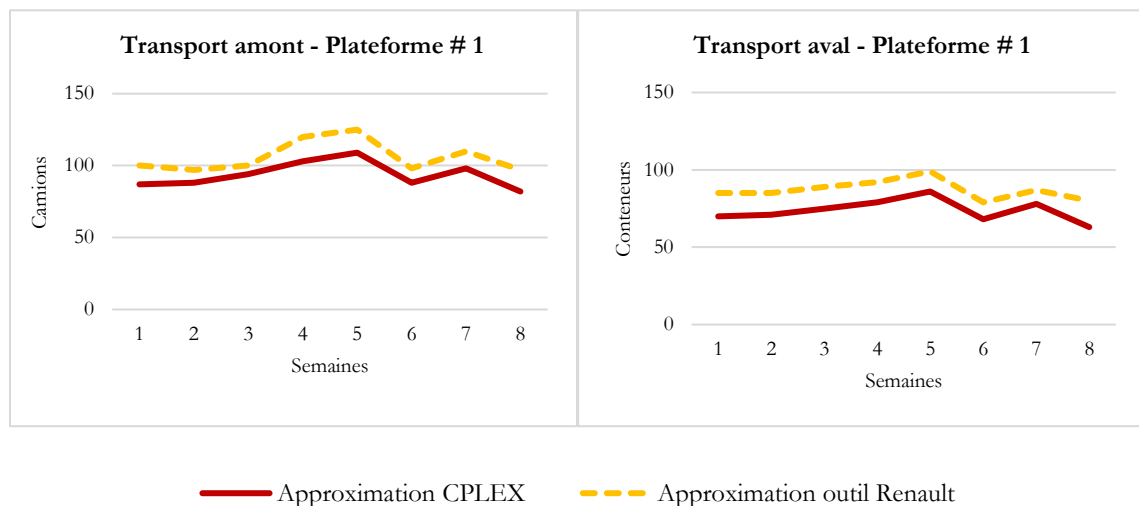


Figure 35. Résultats de l'évaluation des approximations du modèle proposé en utilisant les outils d'optimisation de chargement disponibles chez Renault

### 12.3. Prototype d'optimisation du transport amont et du lissage de l'activité

Pour donner suite au test opérationnel sur le transport amont (Section 11.1.), l'outil d'optimisation du chargement de camions a été enrichi pour inclure les besoins de l'AILN. Sous notre pilotage, le pôle recherche opérationnelle a développé un nouvel outil. La Figure 36

présente le fonctionnement de ce nouveau prototype, affichant en rouge les nouveautés par rapport à l'outil existant. Une notion de dates a été incluse, afin de proposer un programme de réception optimisé. Le programme de réception issu du système d'information AILN fait donc parti des données d'entrée. De même, le plan du transport amont fait partie des contraintes et doit être respecté par l'outil. Finalement, les algorithmes heuristiques ont été enrichis avec un objectif secondaire : celui de lisser la charge de travail à l'AILN. Si pour une pile d'emballages il y a deux camions candidats pour son placement, l'algorithme choisit le camion positionné dans le jour où le volume total ( $m^3$ ) de réception est le plus bas. Cela permet de fournir un résultat avec un nombre minimum de camions à charger et avec une charge de travail lissée dans les différents jours de la semaine.

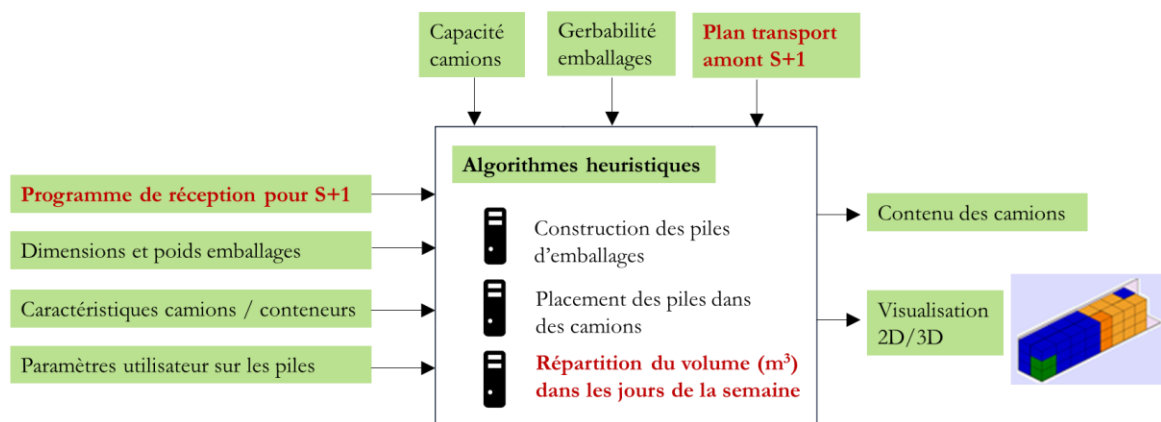


Figure 36. Fonctionnements du prototype d'optimisation du programme de réception et lissage de l'activité AILN

Suite au développement, plusieurs simulations ont été réalisées afin de valider les résultats. La Figure 37 présente les résultats d'une des semaines analysées, pour laquelle le prototype propose 35 camions de moins que le système d'information Renault, avec une charge en réception presque parfaitement lissée. Après cette validation, les tests ont démarré. La procédure est restée inchangée, mais au lieu d'utiliser CPLEX pour le calcul du programme de réception optimisé, on utilisait le nouvel outil (revoir Figure 31). Le périmètre du test a été élargi, passant du 15% du volume hebdomadaire à environ 40% ( $3000 m^3$ ), englobant la plupart de circuits directs et collectage (18 circuits et 30 fournisseurs).



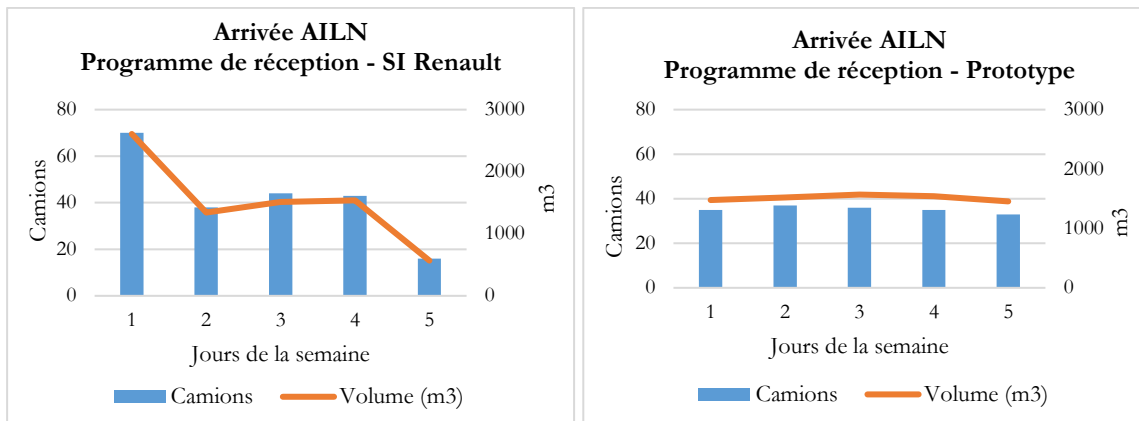


Figure 37. Comparaison entre le programme de réception généré par le système d'information Renault et celui proposé par le nouvel outil d'optimisation

Les résultats du test, réalisé sur 16 semaines, sont présentés dans la Figure 38. En utilisant le prototype d'optimisation, des dépenses à hauteur de 130.000 euros ont été potentiellement évitées, en ce qui concerne le transport amont. Par rapport à l'activité interne, les gains n'ont pas encore été mesurés, notamment car nous travaillons avec une partie de la volumétrie et non pas la totalité. Une analyse plus poussée sera faite dans la continuité de ce travail. D'autre part, une implication renforcée des équipes des AILN a été mise en place afin d'analyser les écarts entre la commande et les réceptions réelles, afin d'analyser et de minimiser les écarts, causés par les trois raisons listées dans la Section 11.1.3. Les erreurs d'approximation du nombre de camions sont moins fréquentes et sont corrigées sur la base des échanges avec les fournisseurs.

Grâce aux bons résultats obtenus avec ses tests, un projet d'évolution du système d'information Renault a été validé pour automatiser l'optimisation du programme de réception, sur la base des algorithmes développées par le pôle recherche opérationnel. Nous avons eu l'opportunité de piloter le développement et de déployer la nouvelle version dans trois AILN.

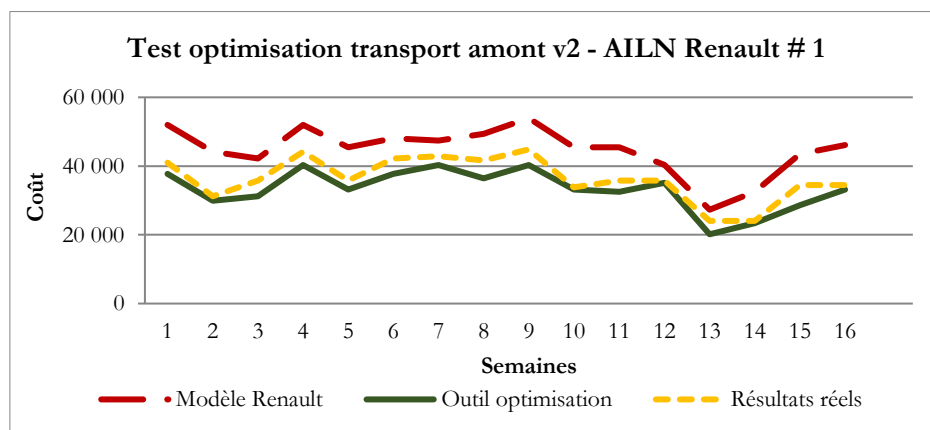


Figure 38. Synthèse des résultats du test sur le transport amont pour l'AILN Renault # 1, en utilisant le nouvel outil d'optimisation

## 13. Modèles CPLEX et prototypes Renault : quelques perspectives

Dans ce chapitre nous adressons des perspectives sur les sujets abordés dans la Partie II et la Partie III de la thèse, sur la base du travail effectué avec le pôle recherche opérationnel Renault et les prototypes d'optimisation. Des adaptations sur les modèles en programmation linéaire déjà proposées pourraient s'avérer pertinentes afin d'inclure des plans de chargement des camions (amont et aval) issus des prototypes d'optimisation Renault.

### 13.1. Sur la planification des flux (Partie II)

Pour rappel, nous avons traité le transbordement dans un réseau logistique avec un centre de crossdock, en prenant en compte les opérations internes dans l'atelier. La principale décision concerne les flux de produits entre les fournisseurs, la plateforme crossdock et les clients, pour chacune des périodes de l'horizon de planification. En parallèle, les activités associées à chaque segment du réseau logistique doivent être définies : en amont, l'estimation du nombre de camions à utiliser, sur la base d'un plan de transport préétabli. En interne, le dimensionnement des ressources et le niveau de stock. En aval, l'estimation du nombre de camions.

Le premier pavé de la Figure 39 rappelle l'approche proposée dans la Partie II de la thèse, basée sur un modèle en programmation linéaire en nombre entiers implémenté dans CPLEX. Cette modélisation a comme objectif la minimisation du coût total (amont, interne et aval) lié à la planification dans les AILN, sur la base des demandes clients hebdomadaires et d'un ensemble de contraintes, notamment sur la capacité des camions (et conteneurs) et la disponibilité des camions en amont. Le résultat fournit les programmes journaliers de réception (nombre de camions et pièces à recevoir), de traitement (repackaging et stockage) et d'expédition (nombre de conteneurs et pièces à expédier). En utilisant les prototypes d'optimisation de chargement disponibles chez Renault, le deuxième pavé de la Figure 39 présente une approche pour évaluer les résultats issus de CPLEX. Ainsi, les coûts amont et aval sont recalculés, sur la base du nombre de camions (amont et aval) proposés par le prototype. En accord avec ce nouveau résultat, le coût de la main d'œuvre peut augmenter (car il y aura plus de camions et de conteneurs à traiter) et donc nécessite une mise à jour. La troisième approche proposée consiste à utiliser les prototypes d'optimisation en premier, pour fixer le nombre et le contenu des camions (amont et aval), pour ensuite utiliser un modèle en programmation linéaire en nombres entiers. Il s'agirait d'une adaptation du modèle original, qui viserait à positionner les camions (amont et aval) dans les périodes (jours) en respectant les mêmes contraintes et avec l'objectif de minimiser les mêmes coûts.

La comparaison des coûts entre les trois approches permettrait de mieux orienter le travail à faire par la suite. Un point clé dans l'utilisation des contraintes sur les contenus des camions (amont et aval), sera la synchronisation entre les flux entrants et sortants du centre de crossdock. Actuellement, l'outil d'optimisation de chargement des camions ne prend pas en

compte la destination finale des pièces, mais uniquement le circuit d'origine. De même, l'outil d'optimisation des conteneurs ne tient pas compte des origines des emballages. Cela peut se traduire par des coûts de main d'œuvre ou de stockage très hauts, induits par les contraintes fortes sur les plans de chargement.

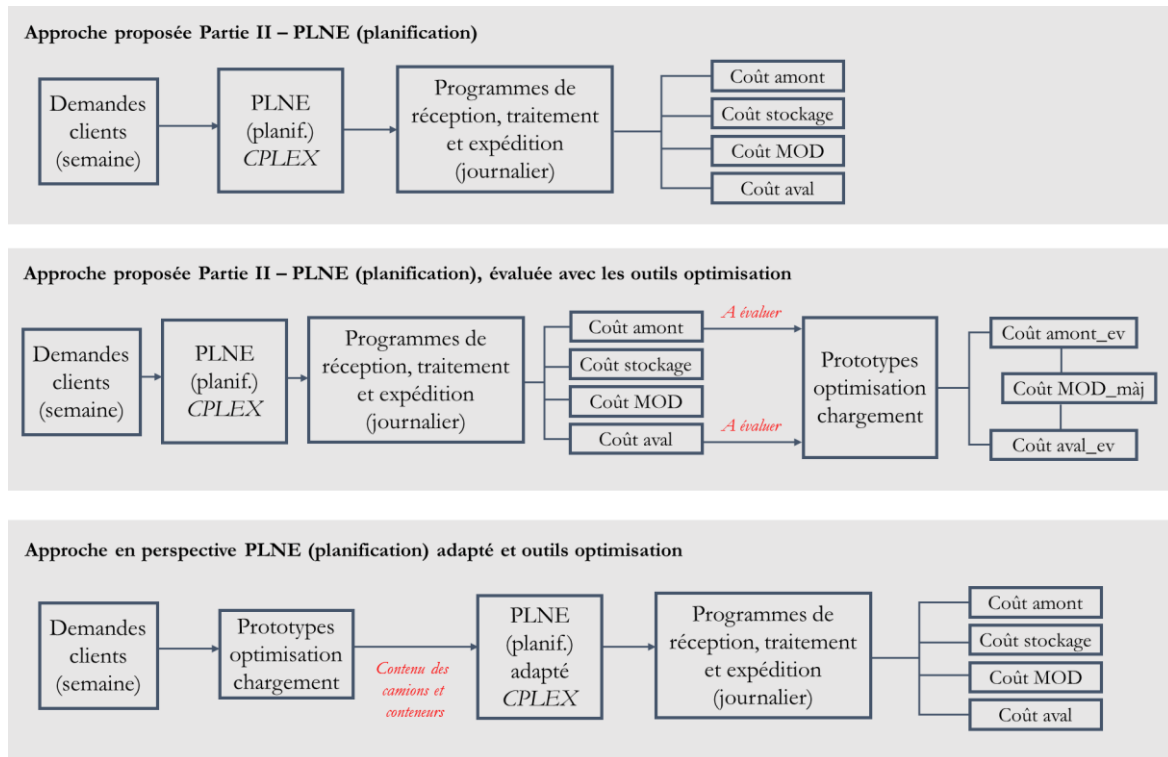


Figure 39. Combinaison des modèles en programmation linéaire et des outils d'optimisation Renault, pour la planification des flux du centre de crossdock

### 13.2. Sur l'ordonnancement des activités (Partie III)

Pour rappel, nous avons abordé la problématique d'ordonnancement des camions et des opérations. Dans l'atelier, quatre zones ont été modélisées : la réception (déchargement de camions), le repackaging, le stock temporaire et l'expédition (chargement de camions). Des capacités liées à chaque opération sont définies : en réception, le nombre de portes disponibles ; en interne, les capacités de l'atelier de repackaging, de la zone de stockage et de la main d'œuvre ; en expédition, le nombre de portes disponibles. Les camions en amont et en aval ont également des capacités maximales liées à une dimension (*métrage linéaire*). Les décisions principales associées à cette problématique comprennent les temps d'arrivée et de départ des camions, l'affectation des produits aux camions et les flux d'emballages entre les zones de l'atelier.

La partie supérieure de la Figure 40 montre l'approche proposée dans la Partie III de la thèse, basée sur un modèle en programmation linéaire en nombre entiers implémenté dans CPLEX. Sur la base des programmes de réception (nombre de camions et pièces à recevoir), de

traitement (repackaging et stockage) et d'expédition (nombre de conteneurs et pièces à expédier), le modèle fournit l'ordonnancement (à la tranche horaire) des activités de réception (contenu des camions et temps d'arrivée), de traitement (repackaging et stockage) et d'expédition (contenu des conteneurs et temps de départ). L'objectif est de minimiser le coût de pénalité lié à la non-utilisation des périodes contractualisées pour l'arrivée des camions amont. Le deuxième pavé de la Figure 40 présente l'approche complète des modèles en programmation linéaire sur la planification et l'ordonnancement, combinés avec l'utilisation des outils d'optimisation disponibles chez Renault. Pour la partie planification, nous reprenons le troisième pavé de la Figure 39, expliqué dans la section précédente. Les résultats de la planification (y compris les contenus des camions et des conteneurs), seraient une partie des données d'entrée pour le modèle d'ordonnancement. Ce dernier serait adapté, en enlevant les décisions sur l'affectation des produits aux camions et en rajoutant des contraintes sur leurs contenus. Le reste du modèle resterait inchangé.

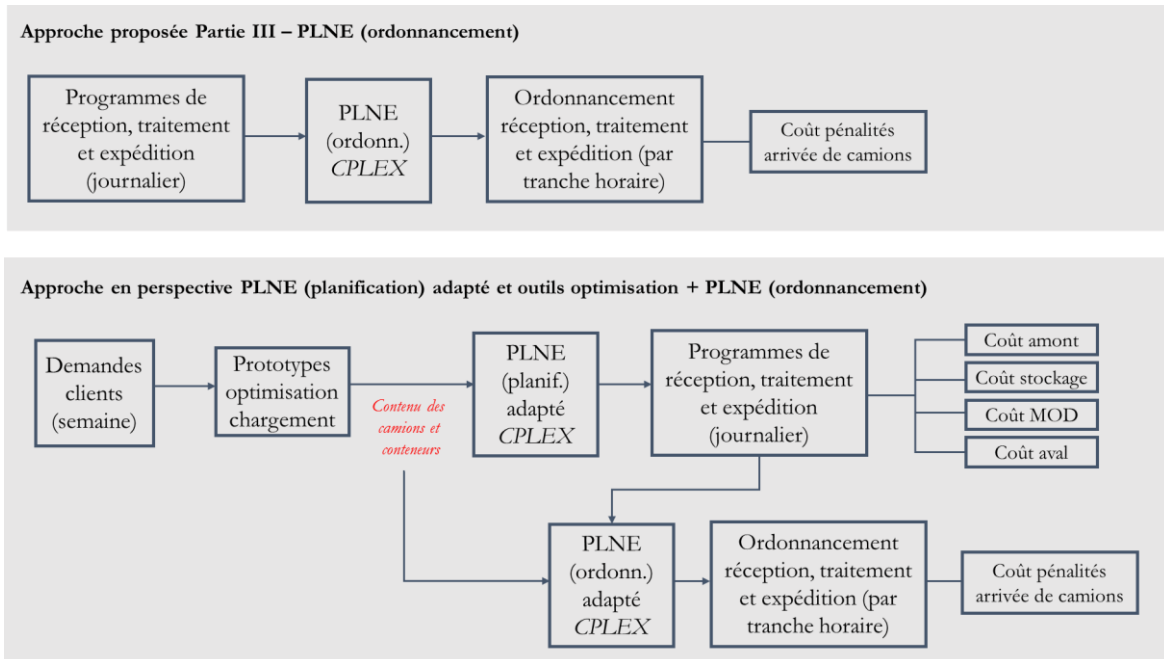


Figure 40. Combinaison des modèles en programmation linéaire et des outils d'optimisation Renault, pour la planification et l'ordonnancement des activités du centre de crossdock

## 14. Conclusion partie IV

Dans cette quatrième partie de la thèse nous avons présenté l'intégration d'une partie des approches proposées dans les processus et les systèmes d'information Renault. D'abord, nous avons réalisé des tests opérationnels dans une plateforme AILN, sur la base d'une simplification du modèle présenté dans la Partie II. En parallèle, nous avons travaillé avec l'équipe du pôle recherche opérationnelle de Renault, pour évaluer nos approches avec les outils d'optimisation de chargement des camions et des conteneurs disponibles. Cette collaboration a abouti également au développement d'un nouvel outil. Finalement, nous avons adressé quelques perspectives pour utiliser conjointement les modèles en programmation linéaire et les outils d'optimisation Renault.

Les premiers tests opérationnels étaient focalisés sur l'optimisation du transport amont. Sur la base des résultats CPLEX, le système d'information Renault est mis à jour pour que les commandes envoyées aux fournisseurs reflètent l'optimisation du transport. La comparaison entre la méthode Renault et notre approche a montré que la réduction potentielle du coût était environ 100.000 euros, pour les 15 semaines de test. L'analyse des résultats réels nous a permis de constater trois sources d'écarts entre les livraisons planifiées et les livraisons réelles. La première est liée à des problèmes capacitaires des fournisseurs, la deuxième à des aléas du transport et la troisième à des erreurs sur l'estimation du nombre de camions faite par notre modèle. Nous avons travaillé sur le troisième sujet, en nous appuyant notamment sur les outils d'optimisation du chargement disponibles chez Renault. Malgré ces écarts, les résultats réels ont affiché une réduction des coûts d'environ 70.000 euros.

Sur la base d'algorithmes heuristiques, le pôle recherche opérationnel de Renault a développé des outils d'optimisation du chargement de camions et des conteneurs. Nous avons utilisé ces prototypes pour évaluer les approximations sur le nombre de camions, faites par notre modèle en programmation linéaire. Les résultats ont montré que le nombre de camions et conteneurs augmente entre 13% et 17%, en grande partie à cause de la grande diversité de types d'emballages utilisés chez Renault. Les algorithmes heuristiques sont plus performants dans la construction des piles combinant plusieurs types d'emballages.

Finalement, nous avons analysé comment intégrer les prototypes d'optimisation de chargement avec les modèles en programmation linéaire, pour améliorer la performance globale de l'approche. Différentes méthodes ont été proposées pour adapter les modèles mathématiques afin d'intégrer des contraintes sur les contenus des camions et des conteneurs, issus des outils d'optimisation. Ces méthodes restent à tester pour valider leur pertinence.

## Conclusion générale

La maîtrise des flux logistiques internationaux est aujourd'hui un sujet majeur dans l'industrie automobile. Afin de pénétrer dans des nouveaux marchés, les constructeurs se sont implantés dans des pays émergents où l'intégration locale de fournisseurs reste faible. Pour assurer l'approvisionnement de ces usines à l'international, des plateformes logistiques d'exportation ont été mises en place à proximité des fournisseurs de pièces de première monte. Fidèles à leur stratégie internationale, Renault et Nissan comptent sur un réseau d'une vingtaine de ces plateformes et l'optimisation des coûts liés au réseau logistique des plateformes et aux opérations internes dans l'atelier est un sujet prioritaire.

Deux aspects majeurs qui impactent la performance de ces plateformes et leur réseau logistique sont la planification et l'ordonnancement des activités dans le centre de crossdock et le réseau logistique associé. En nous focalisant sur ces deux activités, nous avons mené une étude industrielle dans les AILN Renault et Nissan. Les résultats de ce travail nous ont permis d'identifier les caractéristiques, les contraintes et les inducteurs de coûts de chacune des entreprises. Sur cette base, nous avons posé notre problématique, orientée sur l'amélioration des processus de planification et de pilotage des activités dans les AILN Renault. D'un point de vue industriel, cette première partie du travail apporte un benchmark assez complet sur les modes de fonctionnement des plateformes logistiques dans l'industrie automobile.

Le fonctionnement des plateformes AILN étant assez similaire aux centres de crossdock, une revue de la littérature focalisée sur ce domaine a été faite. D'abord, nous avons analysé les principales méthodologies pour aborder les problématiques de crossdocking, notamment sur la manière dont on adresse l'interdépendance entre les décisions liées au centre de crossdock et les décisions liées au management du réseau logistique associée. Des interactions entre le remplissage des camions, leurs temps d'arrivée/départ et le dimensionnement des ressources internes, entre autres, ont été clairement identifiées lors de l'étude industrielle des AILN, mais peu de travaux académiques en tiennent compte. C'est une des perspectives que nous adressons pour la suite de la recherche sur le crossdocking. Deuxièmement, nous avons étudié les modèles mathématiques sur la planification des flux dans un crossdock, en nous focalisant sur deux problématiques : le design du réseau logistique et le transbordement. Nous constatons que certaines caractéristiques issues de notre cas d'étude ne sont pas suffisamment approfondies dans la littérature, à savoir : la prise en compte de contraintes dimensionnelles associées à la capacité des camions (surtout dans un environnement de grande diversité de types d'emballages) et la considération des opérations de repackaging dans l'atelier du crossdock. Troisièmement, nous avons analysé les modèles sur l'ordonnancement des activités. Des simplifications assez communes du problème, comme des environnements mono-porte (1 porte en entrée et une porte en sortie) et des capacités illimitées (ressources et stockage) ne sont pas adaptées à la réalité

industrielle. En général, nous constatons un manque de travaux présentant des cas d'études industriels, qui permettent de valider les modèles proposés. Finalement, une perspective un peu plus large, basée sur notre cas industriel, serait d'aborder les problématiques crossdocking en explorant des domaines académiques différents, comme la synchronisation des lignes d'assemblage (les conteneurs en expédition peuvent être assimilés à des produits) et le bin-packing pour le chargement de camions et de conteneurs.

La Figure 41 synthétise les approches proposées dans cette thèse. Au niveau tactique, une première modélisation en programmation linéaire est développée pour planifier la distribution et les activités du réseau logistique associé au crossdock. L'objectif est de minimiser le coût total, représenté par le nombre de camions à charger (amont et aval), le dimensionnement de la main d'œuvre à mettre en place dans le crossdock et le niveau de stockage de produits. Les résultats de cette planification se traduisent par des contraintes à intégrer dans la deuxième modélisation, notamment le nombre de camions et la main d'œuvre disponible. Ce deuxième modèle se positionne au niveau opérationnel et a comme objectif principal d'ordonnancer les opérations du réseau logistique (affectation des produits aux camions) et les opérations dans l'atelier du crossdock (y compris l'activité de repackaging).

Nous avons utilisé la programmation linéaire pour modéliser les deux approches et CPLEX pour les implémenter. Sur la base des données réelles collectées dans deux plateformes AILN Renault, nous avons mené des expérimentations sur plusieurs instances. Sur le niveau tactique, nous avons pu comparer les résultats avec la méthode Renault, notre modèle fournissant des coûts nettement plus bas. Les résultats obtenus avec le modèle opérationnel ont été un peu moins concluants, car des solutions optimales ont été trouvées seulement pour une partie des instances et donc le développement des méthodes heuristiques est une des suites logiques du travail. De même, des expérimentations plus complètes des deux modèles sont nécessaires, en particulier pour valider que les contraintes apportées par le modèle tactique sont parfaitement intégrables dans le modèle opérationnel. Finalement, malgré le fait d'avoir comme base le fonctionnement des AILN Renault, les modèles proposés semblent adaptables à d'autres configurations de crossdock dans d'autres industries.

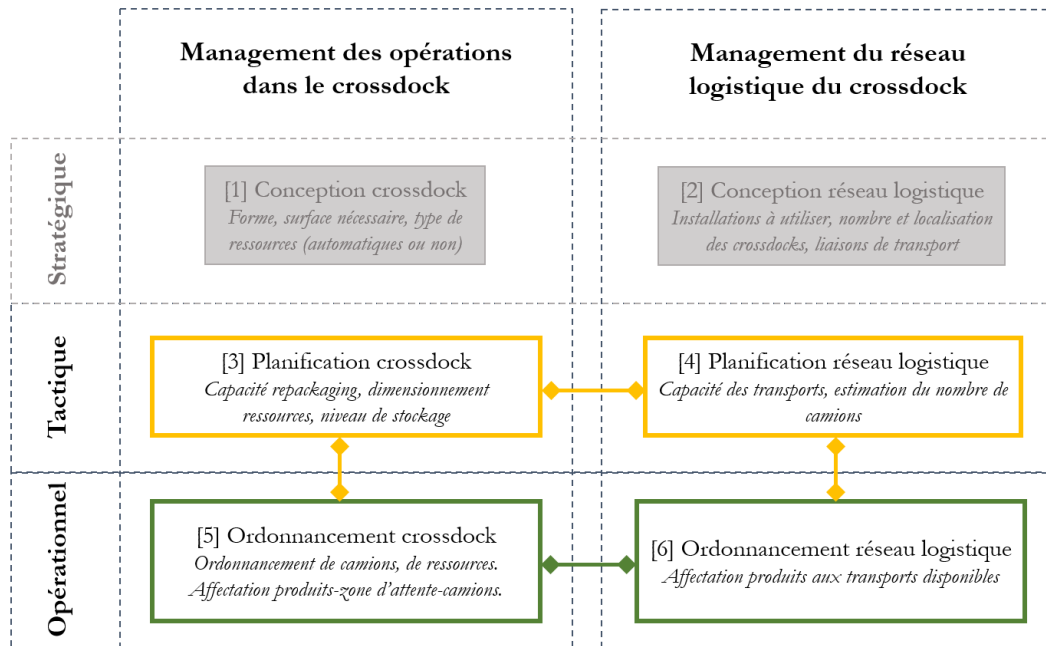


Figure 41. Synthèse des approches proposées dans cette thèse

Les gains potentiels identifiés, notamment sur le transport amont, nous ont encouragés à lancer un test opérationnel dans un AILN Renault. Une simplification du modèle a été faite et sur la base des résultats fournis par CPLEX, les commandes de pièces passées auprès d'un groupe restreint de fournisseur ont été modifiées. Des dépenses à hauteur de 70.000 euros ont été évitées, validant l'intérêt industriel de l'approche. L'analyse des résultats réels nous a permis d'identifier des points d'amélioration du modèle, notamment sur l'estimation du nombre de camions. Pour ce faire, nous avons collaboré étroitement avec le pôle recherche opérationnelle Renault, dont un des domaines d'expertise est l'optimisation du chargement de camions. L'évaluation des approximations fournis par CPLEX ont corroboré la nécessité de travailler sur ce point pour garantir une application réaliste du modèle proposé. Nous avons donc piloté le développement d'un prototype reprenant les bases du modèle en programmation linéaire (amont et interne AILN) et intégrant les algorithmes de chargement de camions. Une deuxième phase des tests opérationnels a été réalisée sur un périmètre plus élargi, donnant des résultats encore meilleurs. Ce travail a abouti à un projet d'évolution du système d'information des AILN qui sera déployé courant 2017 et permettra d'optimiser le transport amont et de lisser l'activité en réception. Cependant, pour avoir une optimisation complète de processus des AILN, il reste à traiter des sujets très importants, comme la synchronisation des flux entrants et sortants. Nos modèles en programmation linéaire le permettent, mais il faudra étudier comment intégrer les notions des piles et les contraintes associés, dans le chargement des camions, et ainsi assurer une applicabilité efficace de l'approche au contexte Renault.





## Bibliographie

- Agustina, D., Lee, C. K. M. & Piplani, R. (2010) 'A review: Mathematical models for cross docking planning', *International Journal of Engineering Business Management*, 2(2), 47–54.
- Agustina, D., Lee, C. K. M. & Piplani, R. (2014) 'Vehicle scheduling and routing at a cross docking center for food supply chains', *International Journal of Production Economics*, 152, 29–41.
- Al-Rodhan, N. R. F. (2006) 'Definitions of globalization: A comprehensive overview and a proposed definition', *Program on the Geopolitical Implications of Globalization and Transnational Security*, 6, 1–21.
- Alpan, G., Ladier, A.-L., Larbi, R. & Penz, B. (2011) 'Heuristic solutions for transshipment problems in a multiple door cross docking warehouse', *Computers and Industrial Engineering*, 61(2), 402–408.
- Alptekinoglu, A. & Tang, C. S. (2005) 'A model for analyzing multi-channel distribution systems', *European Journal of Operational Research*, 163(3), 802–824.
- Alvarez-Perez, G. A., Gonzalez-Velarde, J. L. & Fowler, J. W. (2008) 'Crossdocking-Just in Time scheduling: an alternative solution approach', *Journal of the Operational Research Society*, 60(4), 554–564.
- Bachlaus, M., Pandey, M. K., Mahajan, C., Shankar, R. & Tiwari, M. K. (2008) 'Designing an integrated multi-echelon agile supply chain network: a hybrid taguchi-particle swarm optimization approach', *Journal of Intelligent Manufacturing*, 19(6), 747–761.
- Baumgartner, P. (1998) 'La logistique internationale de Renault : Un soutien à l'exportation', *Logistique & Management*, 6(1), 19–30.
- Bellanger, A., Hanafi, S. & Wilbaut, C. (2013) 'Three-stage hybrid-flowshop model for cross-docking', *Computers & Operations Research*, 40(4), 1109–1121.
- Berghman, L., Leus, R. & Lopez, P. (2012) 'The truck scheduling problem at crossdocking terminals', in *Conference on Project Management and Scheduling (PMS 2012)*. Louvain, Belgium.
- Boloori Arabani, A., Fatemi Ghomi, S. M. T. & Zandieh, M. (2011) 'Meta-heuristics implementation for scheduling of trucks in a cross-docking system with temporary storage', *Expert Systems with Applications*, 38(3), 1964–1979.
- Boloori Arabani, A., Zandieh, M. & Ghomi, S. M. T. F. (2011) 'Multi-objective genetic-based algorithms for a cross-docking scheduling problem', *Applied Soft Computing*, 11(8), 4954–4970.
- Bonturi, M. & Fukasaku, K. (1993) 'Globalisation and intra-firm trade: an empirical note', *OECD Journal: Economic Studies*, (20), 145–159.
- Boysen, N. (2010) 'Truck scheduling at zero-inventory cross docking terminals', *Computers and Operations Research*, 37(1), 32–41.
- Boysen, N. & Flidner, M. (2010) 'Cross dock scheduling: Classification, literature review and research agenda', *Omega*, 38(6), 413–422.
- Boysen, N., Flidner, M. & Scholl, A. (2008) 'Scheduling inbound and outbound trucks at cross docking terminals', *OR Spectrum*, 32(1), 135–161.
- Braekers, K., Ramaekers, K. & Van Nieuwenhuysse, I. (2016) 'The vehicle routing problem: State of the art classification and review', *Computers and Industrial Engineering*, 99, 300–313.

- Brenaut, J.-P. (2004) 'Planification industrielle et diversité : le cas Renault', in *Conférence Internationale de Modélisation et Simulation, MOSIM*. Nantes, France.
- Bricard, H. (2006) 'Construction de schémas de transport de véhicules de l'usine au distributeur final', in *7ème congrès annuel de la Société Française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision, ROADEF*. Lille, France.
- Bricard, H. (2017) 'Affectation sous contraintes d'emballages de pièces dans un nombre minimal de containers', in *18ème congrès annuel de la Société Française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision, ROADEF*. Metz, France.
- Buijs, P., Vis, I. F. A. & Carlo, H. J. (2014) 'Synchronization in cross-docking networks: A research classification and framework', *European Journal of Operational Research*, 239(3), 593–608.
- Carbone, V. & Martino, M. De (2003) 'The changing role of ports in supply-chain management: An empirical analysis', *Maritime Policy & Management*, 30(4), 305–320.
- Carrera, S., Chami, K., Guimaraes, R., Portmann, M.-C. & Ramdane-Cherif, W. (2008) 'Negotiation models for logistic platform planning and scheduling', in *11th International Workshop on Project Management and Scheduling*. Istanbul, Turkey, 43–46.
- Chen, F. & Lee, C. Y. (2009) 'Minimizing the makespan in a two-machine cross-docking flow shop problem', *European Journal of Operational Research*, 193(1), 59–72.
- Chen, P., Guo, Y., Lim, A. & Rodrigues, B. (2006) 'Multiple crossdocks with inventory and time windows', *Computers and Operations Research*, 33(1), 43–63.
- Chibani, A., Delorme, X., Dolgui, A. & Pierreval, H. (2016) 'Approvisionnement d'une chaîne logistique agile : une approche d'optimisation dynamique', *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, 6, 749–768.
- Choon Tan, K. (2001) 'A framework of supply chain management literature', *European Journal of Purchasing & Supply Management*, 7(1), 39–48.
- Christopher, M., Peck, H. & Towill, D. R. (2006) 'A taxonomy for selecting global supply chain strategies', *International Journal of Logistics Management*, 17(2), 277–287.
- Cóccola, M., Méndez, C. A. & Dondo, R. (2015) 'A branch-and-price approach to evaluate the role of cross-docking operations in consolidated supply chains', *Computers and Chemical Engineering*, 80, 15–29.
- Creazza, A., Dallari, F. & Rossi, T. (2012) 'An integrated model for designing and optimising an international logistics network', *International Journal of Production Research*, 50(11), 2925–2939.
- Das, A. & Handfield, R. B. (1997) 'Just-in-time and logistics in global sourcing: an empirical study', *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 27(3/4), 244–259.
- Dauzère-Pérès, S. & Lasserre, J. (2002) 'On the importance of sequencing decisions in production planning and scheduling', *International Transactions in Operational Research*, 9(6), 779–793.
- Dolgui, A., Proth, J.-M. (2006) *Les systèmes de production modernes*. Book. Lavoisier, London.
- Dolgui, A., Proth, J.-M. (2010) *Supply chain engineering: Useful methods and techniques*. Book. Springer, London.
- Dolgui, A., Soldek, J. & Zaikin, O. (2005) *Supply chain optimisation*. Book, Springer US.

- Eksioglu, B., Vural, A. V. & Reisman, A. (2009) 'The vehicle routing problem: A taxonomic review', *Computers & Industrial Engineering*, 57(4), 1472–1483.
- Ertek, G. (2005) 'A Tutorial On Crossdocking', in *Proceedings of 3rd international logistics & supply chain congress*. Istanbul, Turkey.
- Fanti, M. P., Stecco, G. & Ukovich, W. (2016) 'Scheduling internal operations in post-distribution cross docking systems', *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 13(1), 296–312.
- Fazel Zarandi, M. H., Khorshidian, H. & Akbarpour Shirazi, M. (2014) 'A constraint programming model for the scheduling of JIT cross-docking systems with preemption', *Journal of Intelligent Manufacturing*, 27(2), 297–313.
- Fiala, P. (2005) 'Information sharing in supply chains', *Omega*, 33(5), 419–423.
- Fleischmann, B., Ferber, S. & Henrich, P. (2006) 'Strategic planning of BMW's global production network', *Interfaces*, 36(3), 194–208.
- Frigant, V. & Zumpe, M. (2014) 'Are automotive global production networks becoming more global? Comparison of regional and global integration processes based on auto parts trade data', *Cahiers du GRETha*, n° 2014-09.
- Ganeshan, R. (1999) 'Managing supply chain inventories: A multiple retailer, one warehouse, multiple supplier model', *International Journal of Production Economics*, 59(1), 341–354.
- Ghobadian, E., Tavakkoli-Moghaddam, R., Javanshir, H. & Naderi-Beni, M. (2012) 'Scheduling trucks in cross docking systems with temporary storage and dock repeat truck holding pattern using GRASP method', *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 3(5), 777–786.
- González-Benito, J., Lannelongue, G. & Alfaro-Tanco, J. A. (2013) 'Study of supply-chain management in the automotive industry: A bibliometric analysis', *International Journal of Production Research*, 51(13), 3849–3863.
- Gu, J., Goetschalckx, M. & McGinnis, L. F. (2007) 'Research on warehouse operation: A comprehensive review', *European Journal of Operational Research*, 177(1), 1–21.
- Gu, J., Goetschalckx, M. & McGinnis, L. F. (2010) 'Research on warehouse design and performance evaluation: A comprehensive review', *European Journal of Operational Research*, 203(3), 539–549.
- Gue, K. R. (2007) 'Warehouses Without Inventory', *International Commerce Review*, 7(2), 124–132.
- Guerrero, D. & Ng, A. K. Y. (2015) 'The evolving roles of ports in global supply chains: some evidences from french car manufacturers', in *LAME 2015 Conference*. Kuala Lumpur, Malasia.
- Gümüş, M. & Bookbinder, J. H. (2004) 'Cross-Docking and its implications in location-distribution systems', *Journal of Business Logistics*, 25(2), 199–228.
- Gunasekaran, A., Lai, K. hung & Edwin Cheng, T. C. (2008) 'Responsive supply chain: A competitive strategy in a networked economy', *Omega*, 36(4), 549–564.
- Hasani Goodarzi, A. & Zegordi, S. H. (2016) 'A location-routing problem for cross-docking networks: A biogeography-based optimization algorithm', *Computers and Industrial Engineering*, 102, 132–146.

- Hosseini, S. D., Akbarpour Shirazi, M. & Karimi, B. (2014) 'Cross-docking and milk run logistics in a consolidation network: A hybrid of harmony search and simulated annealing approach', *Journal of Manufacturing Systems*, 33(4), 567–577.
- Humphrey, J. (2003) 'Globalization and supply chain networks: the auto industry in Brazil and India', *Global Networks*, 3(2), 121–141.
- Javanmard, S., Vahdani, B. & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2014) 'Solving a multi-product distribution planning problem in cross docking networks: An imperialist competitive algorithm', *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 70(9–12), 1709–1720.
- Jayaraman, V. & Ross, A. (2003) 'A simulated annealing methodology to distribution network design and management', *European Journal of Operational Research*, 144(3), 629–645.
- Kaneko, J. & Nojiri, W. (2008) 'The logistics of Just-in-Time between parts suppliers and car assemblers in Japan', *Journal of Transport Geography*, 16(3), 155–173.
- Kellar, G. M., Polak, G. G. & Zhang, X. (2016) 'Synchronization, cross-docking, and decoupling in supply chain networks', *International Journal of Production Research*, 54(9), 2585–2599.
- Keshtzari, M., Naderi, B. & Mehdizadeh, E. (2016) 'An improved mathematical model and a hybrid metaheuristic for truck scheduling in cross-dock problems', *Computers and Industrial Engineering*, 91, 197–204.
- Kreng, V. B. & Chen, F.-T. (2008) 'The benefits of a cross-docking delivery strategy: a supply chain collaboration approach', *Production Planning & Control*, 19(3), 229–241.
- Ladier, A.-L. & Alpan, G. (2014) 'Crossdock truck scheduling with time windows: earliness, tardiness and storage policies', *Journal of Intelligent Manufacturing*, 1–15.
- Ladier, A.-L. & Alpan, G. (2016) 'Cross-docking operations: Current research versus industry practice', *Omega*, 62, 145–162.
- Larbi, R., Alpan, G., Baptiste, P. & Penz, B. (2011) 'Scheduling cross docking operations under full, partial and no information on inbound arrivals', *Computers and Operations Research*, 38(6), 889–900.
- Lee, Y. H., Jung, J. W. & Lee, K. M. (2006) 'Vehicle routing scheduling for cross-docking in the supply chain', *Computers & Industrial Engineering*, 51(2), 247–256.
- Li, Y., Lim, A. & Rodrigues, B. (2004) 'Crossdocking—JIT scheduling with time windows', *Journal of the Operational Research Society*, 55(12), 1342–1351.
- Lim, L. L. (2014) *A new model for sales and operations planning with long procurement lead time in the automotive industry : a simulation-optimization approach*. Doctoral dissertation, Université Grenoble Alpes.
- Ma, H., Miao, Z., Lim, A. & Rodrigues, B. (2011) 'Crossdocking distribution networks with setup cost and time window constraint', *Omega*, 39(1), 64–72.
- MacCarthy, B., Brabazon, P. G. & Bramham, J. (2003) 'Fundamental modes of operation for mass customization', *International Journal of Production Economics*, 85(3), 289–304.
- Maknoon, M. Y. & Baptiste, P. (2010) 'Moving freight inside cross docking terminals', in *8th International Conference on Supply Chain Management and Information Systems*. Hong Kong.
- Maknoon, M. Y., Soumis, F. & Baptiste, P. (2017) 'An integer programming approach to scheduling the transshipment of products at cross-docks in less-than-truckload industries', *Computers & Operations Research*, 82, 167–179.

- Maknoon, Y. & Laporte, G. (2017) 'Vehicle routing with cross-dock selection', *Computers and Operations Research*, 77, 254–266.
- Marjani, M. R., Moattar Hussein, S. M. & Karimi, B. (2011) 'Bi-objective heuristics for multi-item freights distribution planning problem in crossdocking networks', *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 58(9), 1201–1216.
- Martins, S., Amorim, P., Figueira, G. & Almada-Lobo, B. (2017) 'An optimization-simulation approach to the network redesign problem of pharmaceutical wholesalers', *Computers & Industrial Engineering*, 106, 315–328.
- Masoud, S. A. & Mason, S. J. (2016) 'Integrated cost optimization in a two-stage, automotive supply chain', *Computers and Operations Research*, 67, 1–11.
- Miao, Z., Yang, F. & Fu, K. (2009) 'Transshipment problem with penalty in crossdocking distribution networks', in *Proceedings of the 2009 6th International Conference on Service Systems and Service Management, ICSSSM '09*, 280–285.
- Miao, Z., Yang, F., Fu, K. & Xu, D. (2012) 'Transshipment service through crossdocks with both soft and hard time windows', *Annals of Operations Research*, 192(1), 21–47.
- Mocellin, F. (2006) *Gestion des entrepôts et plates-formes*. Book, Dunod.
- Mohtashami, A. (2015) 'Scheduling trucks in cross docking systems with temporary storage and repetitive pattern for shipping trucks', *Applied Soft Computing*, 36, 468–486.
- Musa, R., Arnaout, J.-P. & Jung, H. (2010) 'Ant colony optimization algorithm to solve for the transportation problem of cross-docking network', *Computers & Industrial Engineering*, 59(1), 85–92.
- Napolitano, M. (2000) *Making the Move to Cross Docking: A Practical Guide to Planning, Designing, and Implementing a Cross Dock Operation*. Book, Warehousing Education and Research Council.
- Nguyen, A. (2012) 'Construction des plans de transport pour les livraisons de pièces en usine', in *13ème congrès annuel de la Société Française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision, ROADEF*. Angers, France.
- Nguyen, A. & Brenaut, J.-P. (2011) 'Gestion de flottes de camions pour le transport des véhicules', in *12ème congrès annuel de la Société Française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision, ROADEF*. Saint-Etienne, France.
- Nguyen, A. & Brenaut, J.-P. (2013) 'Container loading in international logistics platforms for the automotive industry', in *10th EURO Special Interest Group on Cutting and Packing, ESICUP*. Lille, France.
- OICA (2015) *Report on vehicle sales in 2015, Organisation Internationale des Constructeurs Automobiles*. Available at: <http://www.oica.net/wp-content/uploads//total-sales-20151.pdf>.
- Palmer, J. M. (2005) *Level loading and cross docking in a global logistics network*. Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology.
- Prajogo, D. & Olhager, J. (2012) 'Supply chain integration and performance: The effects of long-term relationships, information technology and sharing, and logistics integration', *International Journal of Production Economics*, 135(1), 514–522.
- Ratliff, H. D., Vate, J. Vande & Zhang, M. (1999) *Network design for load-driven cross-docking systems*. Technical report. Georgia Institute of Technology.

- Redi, A. A. N. P. & Yu, V. F. (2013) 'Open Vehicle Routing Problem With Cross-Docking', *Computers & Industrial Engineering*, 94, 6–17.
- Renault (2016) *Atlas Renault*.  
Available at: [https://group.renault.com/wp-content/uploads/2016/03/atlas-2015\\_fr.pdf](https://group.renault.com/wp-content/uploads/2016/03/atlas-2015_fr.pdf).
- Ross, A. & Jayaraman, V. (2008) 'An evaluation of new heuristics for the location of cross-docks distribution centers in supply chain network design', *Computers and Industrial Engineering*, 55(1), 64–79.
- Saddle Creek Logistics Services (2011) *2011 Cross-docking trends report*.  
Available at: [https://www.sclogistics.com/wp-content/uploads/2016/05/WP\\_Cross-Docking-12pg.pdf](https://www.sclogistics.com/wp-content/uploads/2016/05/WP_Cross-Docking-12pg.pdf).
- Sadykov, R. (2012) 'Scheduling incoming and outgoing trucks at cross docking terminals to minimize the storage cost', *Annals of Operations Research*, 201(1), 423–440.
- Shaolong, T. (2007) *The impact of cross-docking operation on supply chain management*. Doctoral dissertation, Hong Kong Polytechnic University.
- Solnon, C., Cung, V.-D., Nguyen, A. & Artigues, C. (2008) 'The car sequencing problem: overview of state-of-the-art methods and industrial case study of the ROADEF'2005 challenge problem', *European Journal of Operational Research*, 191(3), 912–927.
- Stephan, K. & Boysen, N. (2011) 'Cross-docking', *Journal of Management Control*, 22(1), 129–137.
- Sturgeon, T. J., Memedovic, O., Biesebroeck, J. Van & Gereffi, G. (2009) 'Globalisation of the automotive industry: Main features and trends', *International Journal of Technological Learning, Innovation and Development*, 2(1/2), 7–24.
- Sung, C. S. & Song, S. H. (2003) 'Integrated service network design for a cross-docking supply chain network', *Journal of the Operational Research Society*, 54(12), 1283–1295.
- Sung, C. S. & Yang, W. (2008) 'An Exact Algorithm for a Cross-Docking Supply Chain Network Design Problem', *Journal of the Operational Research Society*, 59(1), 119–136.
- The Council of Supply Chain Management Professionals (2013) *Supply chain management terms and glossary*. Available at:  
[https://cscmp.org/sites/default/files/user\\_uploads/resources/downloads/glossary-2013.pdf](https://cscmp.org/sites/default/files/user_uploads/resources/downloads/glossary-2013.pdf).
- Vahdani, B. & Zandieh, M. (2010) 'Scheduling trucks in cross-docking systems: Robust meta-heuristics', *Computers & Industrial Engineering*, 58(1), 12–24.
- Van Belle, J., Valckenaers, P. & Cattrysse, D. (2012) 'Cross-docking: State of the art', *Omega*, 40(6), 827–846.
- Vogt, J. J. (2010) 'The successful cross-dock based supply chain', *Journal of Business Logistics*, 31(1), 99–119.
- Walha, F., Chaabane, S., Bekrar, A. & Loukil, T. (2014) 'The cross docking under uncertainty: State of the art', in *Advanced Logistics and Transport (ICALT), 2014 International Conference on*. Athènes, Grèce, 330–335.
- Waller, M. A., Cassady, C. R. & Ozment, J. (2006) 'Impact of cross-docking on inventory in a decentralized retail supply chain', *Transportation Research Part E*, 42, 359–382.
- Wang, J. J. & Cheng, M. C. (2010) 'From a hub port city to a global supply chain management center: A case study of Hong Kong', *Journal of Transport Geography*, 18(1), 104–115.

- Wen, M., Larsen, J., Clausen, J., Cordeau, J.-F. & Laporte, G. (2009) 'Vehicle routing with cross-docking', *Journal of the Operational Research Society*, 60(12), 1708–1718.
- Witt, C. E. (1998) 'Crossdocking: concepts demand choice', *Material Handling*, 53(7), 44–49.
- Womack, J. P. & Jones, D. T. (2007) *The machine that changed the world: The story of lean production, The machine that changed the world: The story of lean production*. Book, Chapters 1 to 3, Free Press.
- Woxenius, J. (2006) 'Temporal elements in the spatial extension of production networks', *Growth and Change*, 37(4), 526–549.
- Yu, W. & Egbelu, P. J. (2008) 'Scheduling of inbound and outbound trucks in cross docking systems with temporary storage', *European Journal of Operational Research*, 184(1), 377–396.





**École Nationale Supérieure des Mines  
de Saint-Étienne**

**NNT : 2017LYSEM029**

Christian SERRANO

PLANIFICATION ET ORDONNANCEMENT DES ACTIVITÉS DANS UN  
CENTRE DE CROSSDOCK INTERNATIONAL

**Spécialité :** Génie Industriel

**Mots clés :** Industrie automobile, Logistique internationale, Crossdocking, Ordonnancement de camions, Planification des flux, Programmation linéaire en nombres entiers.

**Résumé :**

Afin d'accélérer les flux de produits, de réduire les niveaux de stocks et de faire des économies de transport, les entreprises de presque toutes les industries ont mis en place des centres de crossdock. Ces centres sont un point intermédiaire de consolidation dans une chaîne logistique. Les constructeurs automobiles Renault et Nissan s'appuient sur un réseau international de plateformes crossdock pour lier des fournisseurs de pièces de première monte avec des usines de production lointaines, généralement en outre-mer. Dans un cadre d'un partenariat académique-industriel entre le laboratoire LIMOS et Renault, cette thèse est focalisée sur la planification et l'ordonnancement des activités dans ces centres de crossdock.

Des études de terrain menées chez Renault et Nissan nous ont permis d'identifier les caractéristiques, les contraintes et les inducteurs de coûts des plateformes de crossdock, ainsi que de cibler notre revue de la littérature. Sur ces bases, nous proposons une approche d'optimisation séquentielle, comprenant deux modèles en programmation linéaire en nombres entiers, implémentés dans CPLEX et testés sur des données industrielles de deux plateformes Renault. Les résultats des expérimentations obtenus sur le premier modèle (planification) ont montré une nette amélioration en termes de coûts, par rapport à la méthode Renault. Fort de ce constat, une implémentation industrielle a été faite, avec des résultats aussi probants. Le deuxième modèle (ordonnancement) s'avère pertinent pour des instances de moyenne taille. L'approche proposée permet de répondre à la configuration actuelle des AILN Renault et nous considérons qu'elle est adaptable à d'autres industries.

**École Nationale Supérieure des Mines  
de Saint-Étienne**

**NNT: 2017LYSEM029**

Christian SERRANO

**ACTIVITY PLANNING AND SCHEDULING AT AN INTERNATIONAL  
CROSSDOCK CENTER**

**Speciality:** Industrial Engineering

**Keywords:** Automotive Industry, International Logistics, Crossdocking, Truck Scheduling, Operation Planning, Integer Linear Programming.

**Abstract:**

In order to accelerate product flow, reduce inventory levels and make economies in transportation, companies in almost all industries have set up cross-dock centres. These centres are an intermediate point of consolidation in a supply chain. Car manufacturers Renault and Nissan rely on an international network of crossdock platforms to link suppliers of OEM parts with overseas production plants. In a framework of an academic-industrial partnership between the LIMOS laboratory and Renault, this thesis focuses on the activity planning and scheduling at these crossdock centres.

Field studies conducted at Renault and Nissan allowed us to identify the characteristics, constraints and cost drivers of crossdock platforms, as well as to target our review of the literature. Based on this, we propose a sequential optimization approach, comprising two integer linear programming models, implemented in CPLEX and tested on industrial data of two Renault platforms. Numerical experiments' results obtained on the first model (planning) showed a significant improvement in cost, compared to the Renault method. In light of this results, an industrial implementation was made, with such convincing results. The second model (scheduling) proved to be relevant for medium-sized instances. The proposed approach fits to the current configuration of AILN Renault and we consider that it is adaptable to other industries.