



HAL
open science

Proposition d'indicateurs de robustesse basés sur la prise en compte des risques afin d'évaluer les tournées de transport routier de marchandises

Antoine Clément

► To cite this version:

Antoine Clément. Proposition d'indicateurs de robustesse basés sur la prise en compte des risques afin d'évaluer les tournées de transport routier de marchandises. Autre [cs.OH]. Ecole des Mines d'Albi-Carmaux, 2019. Français. NNT: 2019EMAC0007 . tel-02510667

HAL Id: tel-02510667

<https://theses.hal.science/tel-02510667>

Submitted on 18 Mar 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.

Université Fédérale



Toulouse Midi-Pyrénées

THÈSE

en vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

délivré par

IMT – École Nationale Supérieure des Mines d'Albi-Carmaux

présentée et soutenue par

Antoine Clément

le 5 novembre 2019

Proposition d'indicateurs de robustesse basés sur la prise en compte des risques afin d'évaluer les tournées de transport routier de marchandises

École doctorale et discipline ou spécialité :

EDSYS : Génie Industriel 4200046

Unité de recherche :

Centre Génie Industriel, IMT Mines Albi

Directeurs de Thèse :

Didier Gourc, Professeur, IMT Mines Albi

François Marmier, Maître-Assistant HDR, IMT Mines Albi, *(Co-directeur de thèse)*

Autres membres du jury :

Ali Siadat, Professeur, Arts et Métiers Paris Tech Metz, *(Président)*

Aline Cauvin, Maître de conférences HDR, Polytech'Marseille, *(Rapporteur)*

Fouad Riane, Professeur, Ecole Centrale Casablanca, *(Rapporteur)*

Julien Cegarra, Professeur, INU Champollion, Albi *(Examinateur)*

Virginie Govaere, Chercheur, INRS, Nancy, *(Invitée)*

Daouda Kamissoko, Maître-Assistant, IMT Mines Albi, *(Invité)*

Remerciements

Tout d'abord je remercie Madame Aline Cauvin, Maitre de conférence à Polytech' Marseille, et Monsieur Fouad Riane, Professeur à l'Ecole Centrale Casablanca, pour m'avoir fait l'honneur de rapporter mes travaux. Je tiens également à remercier Monsieur Ali Siadat, Professeur aux Arts et Métiers Paris Tech Metz, pour avoir présidé ma soutenance de thèse, ainsi que Monsieur Julien Cegarra, Professeur à INU Champollion, et Madame Virginie Govaere, Docteur à l'INRS, pour avoir accepté d'évaluer mes travaux.

Ces travaux de thèse ont été encadrés par mon directeur de thèse Monsieur Didier Gourc ainsi que mes deux encadrants Monsieur François Marmier et Monsieur Daouda Kamissoko. Je tiens à remercier Didier qui durant ces trois années m'a donné beaucoup de son temps pour partager ses compétences au cours de longues discussions qui m'ont beaucoup appris. Il m'a également fait confiance en me donnant des responsabilités dans l'enseignement, domaine qui me tient particulièrement à cœur. Ces trois années ont pour moi créé une complicité que je n'oublierai jamais. Je tiens à remercier François qui m'a présenté de nombreuses idées toutes un peu plus folles les unes que les autres mais qui au final m'ont permis de comprendre que le rêve permet de développer son imagination pour trouver la bonne solution, tout cela sans oublier les soirées une guitare à la main. Je tiens à remercier Daouda, qui m'a permis d'approfondir une discipline proche de la mienne, mais également pour l'ensemble de ses discussions pendant la thèse et la rédaction de thèse qui m'ont apporté un grand soutien.

Merci à l'ensemble des membres du projet Smart Planning qui m'ont fait comprendre que finalement la vraie vie, ça dépend.

Je remercie l'ensemble des membres du Centre de Génie Industriel pour l'ambiance agréable mais également pour les nombreuses discussions de couloir permettant de partager nos différents problèmes.

Je n'oublie pas les amis et la famille qui se sont demandés pourquoi j'ai fait une thèse mais qui ont toujours été présents pour me soutenir dans mes choix.

Pour finir je remercie Laurie qui me supporte depuis 5 ans et qui m'a soutenu tout au long de cette thèse en m'aidant également sur la période de rédaction avec les nombreuses relectures et commentaires.

Sommaire

Remerciements	iii
Sommaire	v
<hr/>	
Introduction générale	1
1 Transport routier de marchandises : contexte, enjeux et problématique	5
Introduction	5
1.1 Le transport de marchandises	5
1.2 La gestion de la livraison dernier kilomètre	11
1.3 Les étapes d'une planification opérationnelle	14
Conclusion	16
2 État de l'art sur les risques et les indicateurs	19
Introduction	19
2.1 La notion de risque	20
2.2 Évaluation de la résistance d'un planning	27
Conclusion	33
3 Notation et modélisation d'un planning dans le domaine du TRM	37
Introduction	37
3.1 Structuration des concepts et présentation des modèles de données manipulés	38
3.2 Évaluation des tournées et du planning journalier	49
Conclusion	52
4 Génération automatique des risques à partir d'un portefeuille de dangers	55
Introduction	55
4.1 Définition du concept de danger	56
4.2 Génération des risques	62
4.3 Génération des scénarios de projet	65
4.4 Évaluation des scénarios de projet	69
Conclusion	74

5	Proposition d'indicateurs de robustesse	77
	Introduction	77
5.1	Les attentes du planificateur	79
5.2	Proposition d'indicateurs de robustesse dans le TRM	81
5.3	Démarche d'utilisation des indicateurs de robustesse	86
	Conclusion	94
6	Cas d'application : planification d'une livraison dernier kilomètre	95
	Introduction	95
6.1	Implémentation des contributions	96
6.2	Les données manipulées par le planificateur	97
6.3	Évaluation des plannings journaliers	103
6.4	Interprétation des indicateurs de robustesse	106
	Conclusion	111
	Conclusion générale	113
	Table des figures	117
	Liste des tableaux	121
	Bibliographie	123
	Table des matières	131

Introduction générale

De nos jours, la mondialisation a modifié les approches du transport de marchandises. Les marchandises traversent une grande partie de la planète pour être livrées chez le client final. Pour cela, de nombreux moyens de transport comme le porte-conteneur, l'avion, le train, les camions... sont utilisés pour acheminer l'ensemble des marchandises à bon port. On parle de transport multi-modal.

Aujourd'hui, les demandes des clients finaux sont de plus en plus variées. Le client peut demander à être livré par un véhicule électrique, par un véhicule sécurisé, ou encore refuser que sa marchandise soit dans le même véhicule que celle d'un autre client. Le transport routier de marchandises est le plus souvent le dernier intermédiaire avant le client final. Il a pour objectif de satisfaire l'ensemble des exigences du client.

Pour satisfaire les exigences du client, le planificateur élabore un planning répondant à l'ensemble des demandes des clients (en termes de temps, qualité, coût...). Ce planning joue un rôle majeur dans la vie de l'entreprise du transport routier car c'est à partir de l'exécution de celui-ci que l'activité de l'entreprise s'effectue. Ce planning est créé en temps restreint : le planificateur doit préparer le planning la veille pour le lendemain car les informations nécessaires pour la construction du planning sont de dernière minute. Ce planning est appelé planning journalier.

Il est fréquent de constater des différences parfois importantes entre la tournée réalisée, représentée sous forme de son planning, et la tournée qui avait été planifiée. Lors de l'exécution du planning en temps réel, des perturbations viennent impacter le planning. Ces perturbations vont impacter le planning en termes de temps, c'est-à-dire que la durée des activités est modifiée ou en termes de coût avec une possible augmentation du coût induit par la réalisation de la tournée. L'impact porte également sur le client qui peut avoir un taux de satisfaction réduit si les exigences de départ ne sont pas respectées comme par exemple celles relatives au respect de l'heure de livraison.

Ce constat nous amène donc à la problématique suivante : « Comment aider le planificateur du transport routier de marchandises à choisir un planning dans un contexte risqué ? »

Cette problématique révèle deux axes de recherche. Pour le premier, sur le contexte risqué, notre proposition s'est intéressée aux différents risques pouvant impacter un planning. Suite aux contraintes de temps qu'a un planificateur pour créer un

planning journalier, il est difficile d'identifier les risques sur un planning et de les évaluer rapidement. Le planificateur peut modifier un planning ou même essayer de le comparer à un autre ce qui complexifie ces étapes d'identification et d'évaluation des risques. Cela nous amène à une première question de recherche.

1 : « Comment identifier automatiquement les risques associés à un planning journalier et comment évaluer leurs impacts sur le planning? »

Pour le deuxième axe de recherche sur l'aide à la décision, notre proposition concerne le développement d'indicateurs appropriés. La variété des entreprises de transport routier de marchandises montre la complexité à réaliser une seule modélisation. Cependant, les mêmes notions et indicateurs sont utilisés par les planificateurs. Notre proposition est de présenter des indicateurs permettant d'aider le planificateur en fonction de ses besoins. Le mélange entre le contexte risqué et les indicateurs nous amène à la deuxième question de recherche.

2 : « Quels indicateurs permettent de caractériser la capacité d'un planning à résister aux perturbations? »

Notre proposition est de prendre en compte les risques grâce à un outil d'aide à la décision lors de la construction des plannings journaliers. Pour cela, nous proposons d'utiliser la notion de danger pour modéliser le contexte risqué. A partir des dangers, un mécanisme permettant d'identifier et évaluer les risques sur un planning journalier est détaillé. Une fois les risques positionnés sur un planning, la simulation des différents scénarios va permettre de calculer de nouveaux indicateurs. Nous proposons des indicateurs de robustesse pour aider le planificateur à analyser les plannings et négocier un temps de retard avec le client pour atteindre ses objectifs malgré les perturbations.

Cette thèse s'inscrit dans le projet SMART PLANNING. Le projet SMART PLANNING (ANR-16-CE26-0017) est un projet financé par l'ANR (Agence Nationale de la Recherche). Ce projet s'intéresse à la mise en oeuvre d'un système d'aide à la planification robuste pour le transport routier de marchandises, prenant en compte les enjeux économiques, environnementaux et sociaux en termes de santé et sécurité d'un planning journalier mais également de la prise en compte des risques impactant un planning à l'aide d'indicateurs de robustesse.

La figure 1 illustre le plan de cette thèse.

Le chapitre 1 définit la problématique de la thèse. Il détaille le contexte du transport de marchandises et les différents modes de transport possibles. Ce chapitre se focalise sur le transport routier de marchandises et plus particulièrement sur la livraison dernier kilomètre car il est souvent le dernier intermédiaire avec le client. La planification opérationnelle correspond à la dernière étape pour satisfaire le client et montre que le planning journalier est soumis à des perturbations. Cela permet de poser la problématique de la thèse : Comment aider le planificateur du transport routier de marchandises à choisir un planning dans un contexte risqué?

Le chapitre 2 est un état de l'art composé de deux parties, la première porte sur la notion de risque et la deuxième sur la notion d'indicateur. La première partie définit le risque ainsi que le processus de management des risques composé de quatre

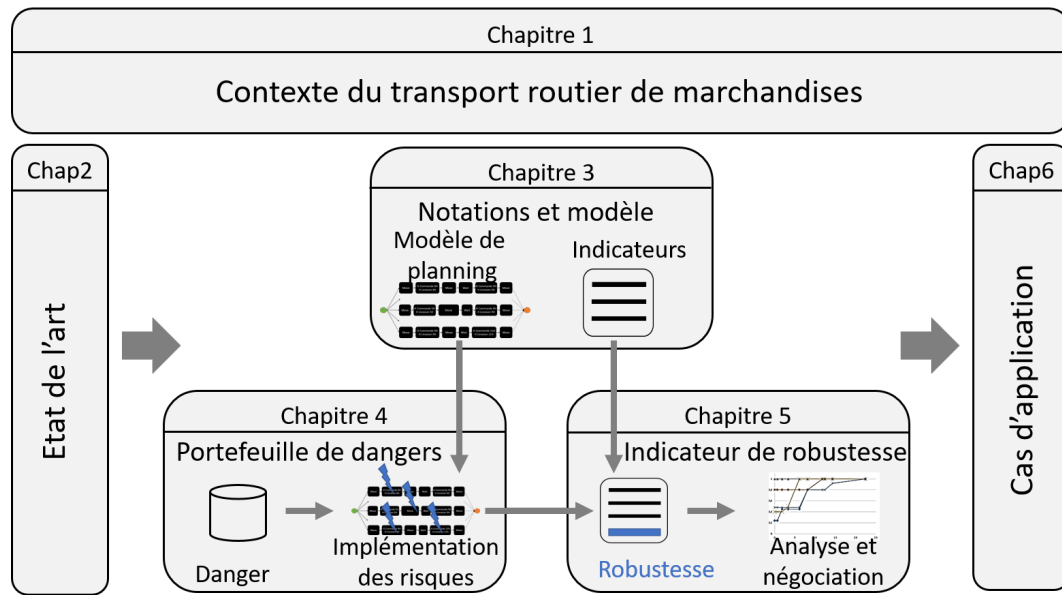


Figure 1 – Organisation du mémoire

étapes (identification, évaluation, traitement et suivi). Elle conclut sur la difficulté à identifier et évaluer les risques rapidement dans le contexte du transport routier de marchandises. La deuxième partie décrit les indicateurs présents aujourd'hui dans le transport routier de marchandises et la notion de robustesse d'un planning.

Le chapitre 3 présente le modèle de données utilisé. Celui-ci permet de structurer les plannings journaliers du transport routier de marchandises. Les concepts de client et d'entreprise de transport sont détaillés. Une méthode d'agrégation permettant d'évaluer les plannings journaliers à partir de l'évaluation unitaire des activités est présentée à la fin de ce chapitre.

Le chapitre 4 propose d'utiliser les dangers menaçant la réalisation d'un planning, pour automatiquement identifier les risques menaçant le respect des contraintes imposées par le client et l'entreprise de transport. Par la suite, la génération de risques permet l'évaluation des scénarios obtenus selon le ou les plannings sélectionnés.

Ensuite, le chapitre 5 propose des indicateurs de robustesse pour aider un planificateur à sélectionner un planning dans un contexte risqué. L'analyse de ces indicateurs permet de présenter les retards de livraison et de négocier un temps de retard avec le client pour améliorer les indicateurs de robustesse.

Enfin, le chapitre 6 évalue le modèle, la détection des risques et les indicateurs de robustesse sur un cas réel. Cette planification correspond à la planification dernier kilomètre d'une demi-journée de livraison dans laquelle un certain nombre de dangers est modélisé pour présenter l'intérêt de la négociation sur le choix du planning.

Chapitre 1

Transport routier de marchandises : contexte, enjeux et problématique

Introduction

L'objectif de ce premier chapitre est de présenter le contexte dans lequel se situent les travaux de cette thèse. Il est composé de trois sections. La section 1.1 présente notre constat sur l'augmentation du nombre de marchandises dans le monde ainsi que les différents modes de transport utilisés. Le mode de transport le plus utilisé pour réaliser la dernière étape de livraison reste le transport routier. Dans ce dernier mode, nous présentons dans la section 1.2 l'intérêt de la satisfaction client. Pour cela, les différents niveaux de prise de décision (stratégique, tactique et opérationnel) et de l'utilisation de la planification sont détaillés pour répondre aux besoins des clients. La planification opérationnelle étant l'étape la plus détaillée, la section 1.3 présente les étapes journalières de la planification opérationnelle dans le transport routier de marchandises. L'observation de différences importantes entre le planning prévu et le planning réalisé, dues entre autres aux perturbations qui surviennent pendant la réalisation des tournées, permet d'introduire notre problématique de recherche :

Comment aider le planificateur du transport routier de marchandises à choisir un planning dans un contexte risqué ?

1.1 Le transport de marchandises

Aujourd'hui voyager devient de plus en plus simple. Que ce soit par voie terrestre, aérienne ou même maritime, de plus en plus de moyens sont mis à notre disposition pour rejoindre notre destination finale. Cependant, nous ne sommes pas les seuls à voyager. Nos biens de consommation se déplacent aussi.

1.1.1 Les différents modes de transport

Selon Venturelli et al. (2006) les modes de transport de marchandises peuvent être classés selon deux familles, les transports "Oversea" (outre-mer) et les transports terrestres.

La dénomination "Oversea" correspond au fait que les transports sont effectués outre les océans. Dans le transport "Oversea", les deux modes de transport considérés sont le transport aérien et le transport maritime.

Les transports terrestres concernent les modes de transport permettant de livrer sur des distances plus faibles, souvent restreintes à un seul continent. Les trois modes de transport les plus connus sont le fluvial, le ferroviaire et le routier.

Le transport aérien est l'un des derniers modes de transport apparu pour le transport de marchandises. Son apparition date du 20ème siècle, où il s'est développé initialement pour transporter du courrier. Aujourd'hui, ce service est le plus coûteux et le plus rapide. Cependant, il n'est pas adapté pour les marchandises lourdes car l'avion est limité par sa charge utile.

Le transport maritime joue un rôle crucial dans le commerce mondial (Bauchet, 1991). En opposition à l'aérien, ce transport est l'un des plus vieux de l'histoire : dès l'antiquité, les civilisations utilisaient le bateau pour déplacer les marchandises ou matières premières qu'ils utilisaient (Célérier, 1965). Aujourd'hui, le transport maritime est considéré comme lent mais possède de nombreux avantages comme sa grande capacité pour transporter les marchandises, son coût relativement faible et la possibilité de parcourir de grandes distances.

Le transport fluvial peut être associé au transport maritime car il possède les mêmes avantages. Il permet de transporter des tonnages importants de manière peu coûteuse. Cependant, ce mode de transport est très dépendant des voies navigables du pays ou du type de marchandise transportée.

Le transport ferroviaire est un mode de transport très compétitif car il permet de transporter des petits colis, des colis volumineux ainsi que des colis lourds. Cela montre la diversité qu'il peut proposer. De plus, c'est un transport peu coûteux. Il dépend cependant du réseau ferroviaire disponible. C'est-à-dire que la vitesse de transport dépend de la qualité du réseau ferroviaire et que les destinations possibles dépendent de la diversité de ce réseau.

Le transport routier est le mode de transport le plus visuel car le réseau routier est le même pour les voyageurs que pour les marchandises. Le transport routier est composé de deux parties : le transport grande distance et le transport dernier kilomètre (inférieur à 150km). La partie grande distance est souvent en concurrence avec les autres modes de transport terrestres. Tandis que la partie dernier kilomètre correspond à la particularité du transport routier car il permet d'effectuer la livraison à la porte du client.

1.1.2 Augmentation du volume de marchandises transportées

Dans le transport maritime, selon l'OCDE¹, la quantité de marchandises par pays est en augmentation depuis plus de 40 ans. Pour arriver à ce constat, l'OCDE prend en compte l'évolution de la quantité de marchandises transportées par voie maritime en milliers de tonnes pour un ensemble de 35 pays. La Corée, le Japon et les États-Unis sont les plus gros exportateurs. En 2016, la Corée a exporté 437 063 milliers de tonnes, le Japon 281 267 milliers de tonnes et les États-Unis 275 912 milliers de tonnes. La figure 1.1 montre la quantité de marchandises transportées par voies maritimes entre 1994 et 2015. Ces chiffres, extraits de l'OCDE, permettent de voir que la globalité des marchandises transportées sur les 35 pays est en augmentation constante sur plus de 20 ans.

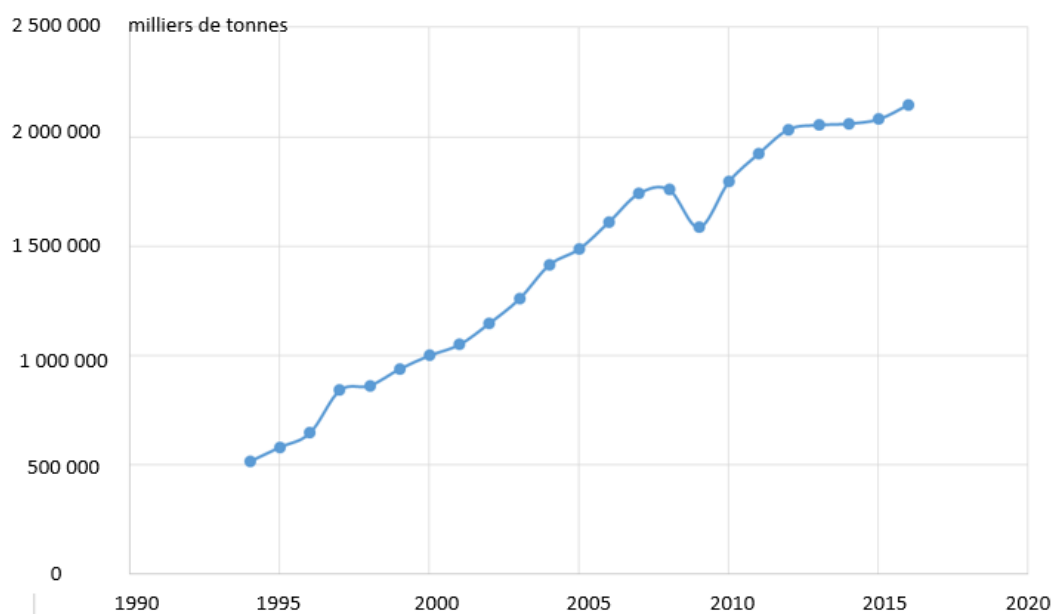


Figure 1.1 – Vision globale de la quantité de marchandises transportées en milieu maritime

D'après les chiffres présentés par l'OCDE sur le transport terrestre, le nombre de marchandises transportées augmente pour les 31 pays dont les données sont présentes. Les États-Unis utilisent énormément le transport terrestre : la quantité transportée était de 4 490 467 millions de tonnes-kilomètres en 1980 pour 7 730 254 millions de tonnes-kilomètres en 2011. Pour l'Australie, le transport terrestre passe de 60 814 millions de tonnes-kilomètres en 1970 à 613 610 en 2015 millions de tonnes-kilomètres ou encore le Canada passe de 387 006 millions de tonnes-kilomètres en 1996 à 664 561 millions de tonnes-kilomètres en 2015, ou encore la Pologne dont le transport

1. OCDE : Organisation de Coopération et de Développement Économiques : <http://www.oecd.org/fr/>

terrestre passe de 124 296 millions de tonnes-kilomètres en 1970 à 425 313 millions de tonnes-kilomètres en 2017.

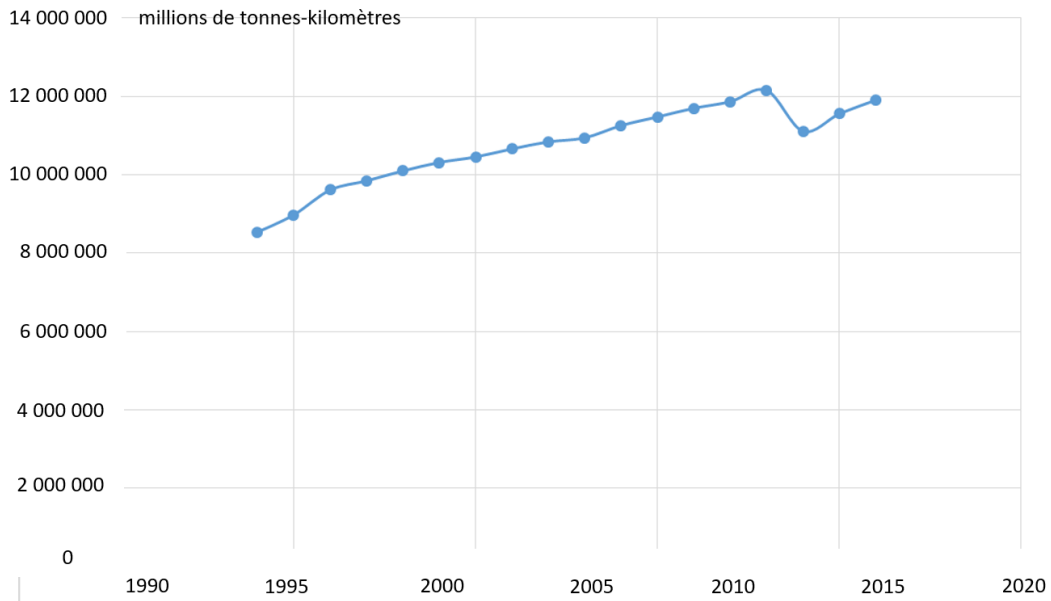


Figure 1.2 – Vision globale de la quantité de marchandises transportées par voie terrestre

L'analyse de l'évolution en millions de tonnes-kilomètres cumulés (figure 1.2) sur la période 1994-2011 montre une augmentation de l'utilisation des transports terrestres passant de 8 538 503 millions de tonnes-kilomètres en 1994 à 11 906 270 millions de tonnes-kilomètres en 2011.

Maintenant que nous avons observé l'augmentation des mouvements de marchandises entre pays et à l'intérieur de chaque pays, prenons le cas de la France pour illustrer l'évolution du transport terrestre. Sauvart (2002) montre la croissance des flux de transport de marchandises en France par rapport à la croissance économique du pays pour les transports terrestres. Son graphique figure 1.3 illustre tous les modes de transports terrestres (fluvial, ferroviaire et routier) entre 1830 et 2000. La tendance de tous les transports montre une augmentation de la quantité de marchandises transportées. Dans ce même ouvrage, Sauvart (2002) présente un autre graphique, reproduit figure 1.4, qui montre le déclin du transport fluvial, lorsque le ferroviaire était majoritaire et l'explosion de l'utilisation du transport routier à partir de 1945.

Cette section a permis de montrer l'augmentation de la quantité des marchandises transportées. Après avoir observé une augmentation constante des tonnages de marchandises livrées et notamment par voie terrestre, nous allons nous intéresser plus particulièrement à la phase de livraison des marchandises au client final dite livraison dernier kilomètre.

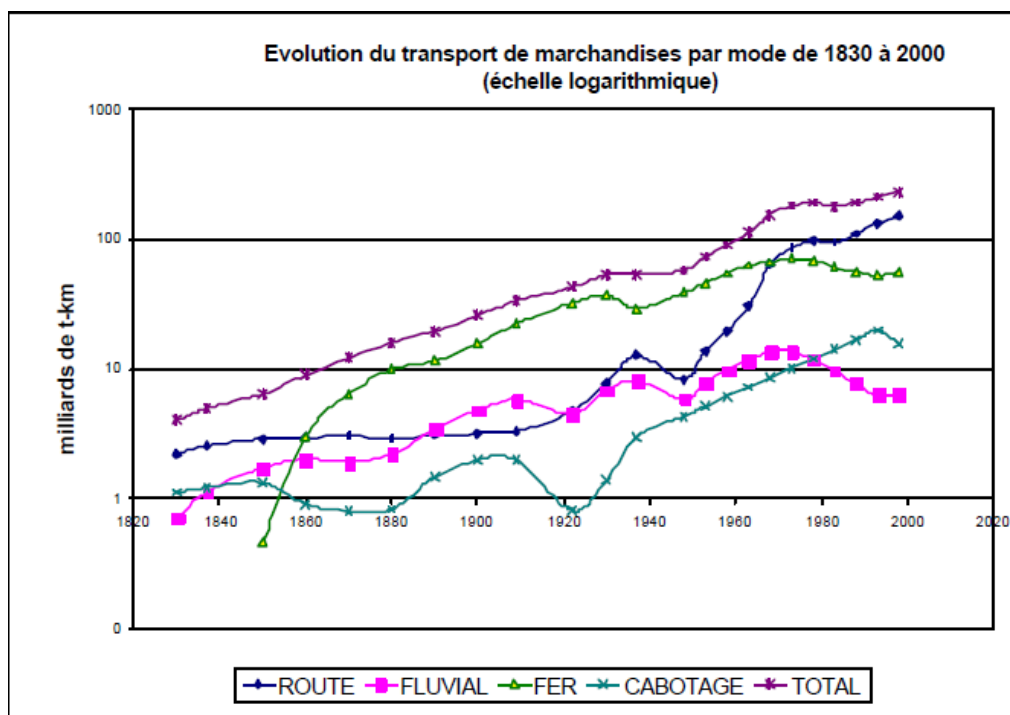


Figure 1.3 – Quantité de marchandises sur les voies terrestres en France (Sauvant, 2002)

1.1.3 La livraison au client final

Venturelli et al. (2006) exposent dans leur ouvrage une vision détaillée du transport logistique avec une partie décrivant le transport de marchandises. Un tableau récapitulatif des différents modes de transport (Aérien, Maritime, Fluvial, Ferroviaire et Routier), présente les caractéristiques de chaque mode. Les différentes caractéristiques décrivent chaque mode de transport pour savoir s'il est adapté :

- aux petits colis ;
- aux colis volumineux ;
- aux produits lourds ;
- aux transports combinés autres que les conteneurs ;
- au porte à porte.

Elles décrivent également le coût, les contraintes d'emballage et la rapidité. Venturelli et al. (2006) présentent le transport routier de marchandises comme le seul transport pouvant effectuer la livraison porte à porte sauf cas exceptionnels. Les cas exceptionnels sont l'installation d'un terminal embranché pour les transports aérien et ferroviaire et l'installation d'un site portuaire pour les transports maritime et fluvial.

Une marchandise va être transportée par plusieurs moyens de transport avant d'atteindre le client final, cela s'appelle le transport multimodal. Cependant dans la majorité des cas, le transport routier permet d'effectuer la dernière livraison. Nous

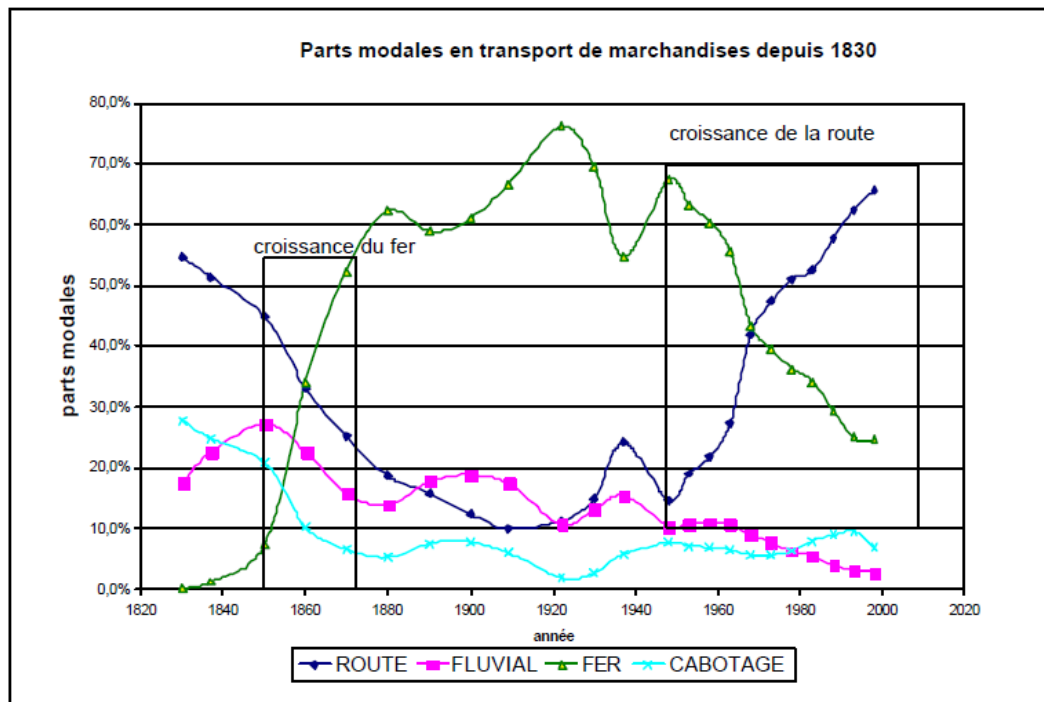


Figure 1.4 – Pourcentage de répartition des utilisations des voies terrestres en France (Sauvant, 2002)

allons donc nous intéresser au transport routier de marchandises pour la suite du manuscrit.

Aujourd’hui, selon le ministère de la transition écologique et solidaire², en France, le transport de marchandises routier correspond à 87.1% du transport de marchandises terrestre. Environ 34 800 entreprises sont présentes dans ce secteur pour un total de 351 400 employés en 2015. D’un point de vue de la livraison finale, 78 % des tonnages sont transportés dans un rayon de moins de 150 km, ce qui montre que la majorité des marchandises doit être acheminée sur des petites distances.

Cette section a présenté l’augmentation du tonnage des marchandises à transporter jusqu’au client final. Cela nous a amené à nous intéresser au transport routier de marchandises, souvent le dernier intermédiaire de cette livraison. En France, de nombreuses entreprises se positionnent sur ce marché du transport routier de marchandises. Cela génère de la concurrence entre les entreprises. Pour avoir des parts de marché ou les garder, les entreprises de transport routier sont dans l’obligation de satisfaire au mieux le client.

2. Site du ministère : <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/economie-du-secteur-du-transport-marchandises-trm>

1.2 La gestion de la livraison dernier kilomètre

Pour satisfaire le client, l'entreprise de transport prend des décisions pour effectuer la livraison dernier kilomètre. Dans cette section, nous verrons les trois niveaux (stratégique, tactique et opérationnel) de prise de décision ainsi que les outils utilisés.

1.2.1 Les différentes prises de décision

Les décisions dans les entreprises de transport routier de marchandises se font à trois échelles de temps différentes. Les décisions peuvent concerner le long terme, le moyen terme ou le court terme.

Le **niveau stratégique** correspond à des prises de décision long terme. Ces décisions sont le plus souvent prises par la direction générale. Elles peuvent être prises pour un horizon de plusieurs mois ou années. Elles concernent, par exemple, le choix de la flotte de transport, notamment sur l'aspect environnemental et la quantité des ressources à mobiliser de façon globale pour estimer la taille de flotte nécessaire. Elles peuvent aussi s'intéresser au choix des ressources humaines, au choix du système informatique utilisé... Le niveau stratégique concerne donc les enjeux économiques, environnementaux et sociétaux de chaque entreprise.

Le **niveau tactique** correspond à des prises de décision à moyen terme. Selon Montoya-Torres et al. (2016), dans le domaine de la livraison de marchandises, « la planification tactique, correspond à la phase de planification à moyen terme concernant les prévisions, les expéditions, les stocks, la gestion de la production et le contrôle de la qualité ». Ces décisions, souvent prises par les responsables d'exploitation ou les responsables de site, peuvent également concerner les sujets comme la fréquence de livraison d'un client, la politique de groupage des livraisons, les itinéraires et modes de transport pour chaque demande. L'horizon des décisions peut varier de plusieurs jours à plusieurs semaines.

Ces décisions cherchent à satisfaire les clients qui reçoivent les marchandises. Selon Esper et al. (2003), « les décideurs en matière de logistique devraient se concentrer sur les questions de transport et de livraison en tant que composantes clés de la satisfaction des consommateurs en ligne ». Cependant comme le dit le proverbe, « le client est roi » et cela expose le transport de marchandises à de plus en plus d'exigences du client qui peuvent être de plus en plus difficiles à gérer. Le client peut refuser une commande si la livraison a un retard d'une minute et demander la réalisation de cette livraison le lendemain. Il peut demander un véhicule sécurisé, ou dédié avec les couleurs de son entreprise. Le client peut refuser de mélanger ses marchandises avec celle d'un autre client...

Le **niveau opérationnel** correspond à des prises de décisions court terme. Les décisions opérationnelles correspondent au travail de l'exploitant ou du planificateur. Pour ce niveau, l'horizon est court terme, d'environ une journée. Le planificateur essaie de répondre aux objectifs demandés au niveau stratégique par l'entreprise

de transport et au niveau tactique par les exigences clients. Le planificateur est le coordinateur entre l'ensemble des exigences clients, les exigences de l'entreprise ainsi que les ressources qui lui sont mises à disposition.

Pour structurer l'activité de l'entreprise de transport de marchandises, des planifications sont réalisées aux niveaux tactique et opérationnel.

1.2.2 Planification et outils de planification

Au niveau tactique, un plan de transport est réalisé. Ce plan de transport est une première vision de planning macroscopique qui permet à l'entreprise de projeter l'ensemble des ressources qui lui seront nécessaires pour les prochaines semaines ou jours à venir que ce soit pour les véhicules ou pour les conducteurs. Son objectif est de faciliter la planification opérationnelle.

Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	
						Client 1 3h45
						Client 2 14h45
13h		14h	14h	13h		Client 3 entre 12h30 et 15h30
						Client 4 11h
						Client 5 5h15
Semi	Semi	Semi	Semi			Client 6 7h30
						Client 7 7h30
Livraison	Enlèvement		Livraison	Enlèvement		Client 8 17h
						Client 9 10h
Conducteur1 9h	Conducteur1 10h	Conducteur1 10h	Conducteur1 9h			Client 10 21h
						Client 11 entre 9h et 12h
						Client 12 7h
Porteur	Porteur		Porteur	Porteur		Client 13 9h
						Client 14 12h
5 Tours	4 Tours	2 Tours	3 Tours	3 Tours		Client 15 6h

Figure 1.5 – Exemple d'un plan de transport

La figure 1.5 est un exemple de plan de transport. Sur la colonne de droite se trouve l'ensemble des clients à livrer avec des petites précisions sur la particularité du client. Les six premières colonnes sont les jours de la semaine. Si la case est grise cela signifie que le client ne doit pas être livré ce jour-là. A l'intérieur des cases se trouvent des informations complémentaires comme des heures à respecter, le type de véhicule à utiliser (semi, porteur), s'il s'agit d'une livraison ou d'un enlèvement... Ce plan de transport donne une vision macroscopique de l'ensemble des clients à livrer sur une semaine. Mais au moment de sa construction, il peut manquer des informations comme la quantité de palettes à livrer par exemple. L'horizon présenté par un plan de transport est d'une semaine et la fréquence de modification peut varier d'une semaine si les clients sont ponctuels à quelques mois si les clients sont réguliers pour l'entreprise de transport.

Au niveau opérationnel, la planification réalisée s'appelle un planning journalier. Un planning journalier est précis, il indique les différents clients à livrer, quel conducteur est chargé de la livraison et avec quel véhicule. L'horizon planifié est d'une journée et la

fréquence de modification est également quotidienne. Le nombre de palettes par client peut être précisé pour éviter les erreurs de livraison. La planification opérationnelle est souvent vue comme la détermination du trajet optimum (Montoya-Torres et al., 2016).

Pour piloter toutes ces prises de décisions, des logiciels appelés Transport Management System ont été conçus pour aider le planificateur. Les TMS (Transport Management System) permettent de générer un planning selon différents types d'optimisation que ce soit la durée de réalisation, le taux de remplissage des véhicules, etc.

L'objectif de cette partie n'est pas de faire une revue de la littérature des TMS (Transport Management System) ou logiciel de gestion du transport mais de parler de l'ensemble des fonctionnalités que couvre ce type de logiciel. Comme le précise le site "<https://www.faq-logistique.com>", les TMS couvrent de plus en plus d'activités dans le domaine du transport.

Pour le domaine du transport routier de marchandises, les fonctionnalités proposées par les TMS sont :

- l'optimisation et conception des schémas de transport ;
- la construction et analyse des budgets de transport ;
- la planification des tournées de livraison et/ou collecte ;
- l'optimisation des tournées ;
- l'optimisation des chargements (taux de remplissage) ;
- la traçabilité en temps réel des expéditions ;
- le suivi des anomalies et des réserves de transports ;
- la pré-facturation du transport
- le reporting, par la présence d'indicateurs comme : respect des délais de livraison, taux de remplissage des camions, taux d'occupation des moyens de transport, émissions de CO2.

Il est important de noter qu'aujourd'hui les besoins des entreprises sont multiples et variés. Les entreprises ne fonctionnent pas de la même façon et les fonctionnalités proposées par les TMS ne sont pas toutes nécessaires. Pour couvrir un marché plus important, l'implémentation des TMS se doit d'être modulable et personnalisable.

L'interface proposée pour présenter des plannings journaliers est souvent standard. C'est pour cela que les vendeurs de TMS proposent une adaptation de cette interface pour qu'elle corresponde plus aux besoins de l'entreprise de transport routier de marchandises. Cependant, la liste des indicateurs présentés reste la même, il s'agit juste du mode de visualisation qui change. Les indicateurs sont généralement restreints au domaine économique ou environnemental (taux de remplissage des camions, taux d'occupation des moyens de transport, émissions de CO2). Une partie des TMS permet d'effectuer un suivi en temps réel, ce qui est un vrai atout pour la livraison d'un client.

Cependant l'expertise du planificateur est souvent négligée dans l'ensemble des fonctionnalités proposées par les outils. La littérature montre que ces logiciels ne

sont pas assez performants malgré le fait qu'ils soient modulables. Du point de vue de l'optimisation, Crainic et al. (2004) et Montreuil (2011) montrent que les volumes des véhicules utilisés restent très faibles, ce qui n'est pas optimal pour la planification. Du point de vue de la planification urbaine, Knoflacher (2007) montre que ces technologies ne sont pas encore adaptées pour prendre en compte les problèmes environnementaux et sociaux auxquels sont confrontés les planificateurs. Cela explique que la planification opérationnelle est souvent réalisée de manière manuelle.

1.3 Les étapes d'une planification opérationnelle

Un planning journalier est un projet quotidien ayant des objectifs à satisfaire. Il est donc formé sur la base du cycle de vie d'un projet. Westland (2007) fait une proposition de ce cycle en quatre phases : l'initiation, la création, l'exécution et la clôture du projet. Avec les observations terrain et l'adaptation au domaine de la planification dernier kilomètre, le cycle de vie peut être représenté en cinq étapes.

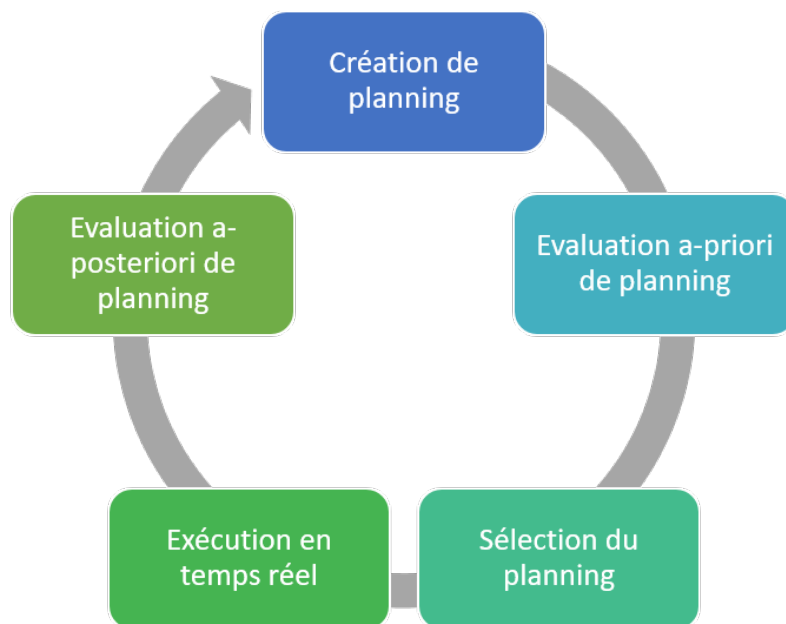


Figure 1.6 – Processus de planification, niveau opérationnel

La figure 1.6 présente les cinq étapes réalisées quotidiennement pour la création d'un planning journalier :

- la création de planning ;
- l'évaluation a priori de planning ;
- la sélection du planning ;
- l'exécution en temps réel ;
- l'évaluation a posteriori du planning.

1.3.1 Phase de création de planning

La phase de création de planning a pour objectif de générer un ensemble de solutions pouvant répondre aux contraintes du problème de la livraison dernier kilomètre avec les différentes exigences des clients. La phase de création de planning doit satisfaire un ensemble de commandes. Les commandes détaillent les sites qui doivent être livrés, à quelle heure et quelles sont les marchandises à livrer (souvent une quantité de palettes). Le planning est composé d'un ensemble de tournées qui va satisfaire une partie des commandes présentes. La tournée est réalisée par un couple conducteur/véhicule.

1.3.2 Phase d'évaluation a priori de planning

Lors de la phase d'évaluation, le planificateur se base sur des indicateurs pour sélectionner son planning. Aujourd'hui, les indicateurs présentés par les logiciels sont majoritairement économiques et environnementaux. Comme le montre Köhler et al. (2019), l'évaluation de planning est assez complexe. Ils s'intéressent à l'indicateur économique lié à la rentabilité d'un planning. Ils cherchent le planning qui satisfera le plus de critères parmi une liste de critères prédéfinie par le planificateur. Meier et al. (2013) déclarent que les indicateurs sont majoritairement financiers, mais il propose une liste d'indicateurs tels que la satisfaction client, l'utilisation des ressources...

1.3.3 Phase de sélection du planning

A partir des différents indicateurs, le planificateur sélectionne le planning qui lui semble correspondre le plus à ses besoins et ses objectifs de la journée. Cependant la connaissance du logiciel est limitée par rapport à son expertise. De ce fait, un planning généré à l'aide d'un algorithme de façon optimale n'est pas forcément celui sélectionné. Cette étape est cruciale lors de la planification car le planificateur doit satisfaire l'ensemble des objectifs de son entreprise sur des indicateurs comme l'économie et satisfaire le client sur la structure du planning.

Dans la partie sélection du planning, la majorité des travaux réalisés propose une seule et unique solution extraite d'un algorithme d'optimisation. Le multicritère est donc souvent utilisé pour définir quelle serait la meilleure solution. Par exemple, Szymon et al. (2013) proposent de résoudre un VRP à l'aide d'une implémentation du multicritère dans un algorithme Tabu. Le problème est qu'ils ne cherchent pas à proposer un ensemble de plannings adaptés pour laisser le planificateur choisir selon son expertise.

1.3.4 Phase d'exécution en temps réel

La phase d'exécution en temps réel a pour objectif de se rapprocher au maximum du planning sélectionné. Cependant, pendant cette phase, le planificateur doit faire face aux différents aléas qui peuvent perturber son planning. Les outils de cette phase sont en pleine expansion, notamment à l'aide des appareils de tracking permettant

de suivre en temps réel la marchandise. L'utilisation de terminaux permet également de scanner les marchandises livrées pour confirmer une livraison à un client. Les systèmes de tracking permettent de connaître le nombre de kilomètres parcourus, le temps de conduite, le temps d'arrêt, la consommation des véhicules...

Les exigences sont de plus en plus fortes, c'est pourquoi les systèmes d'informations évoluent. Schoen et al. (2018) présentent l'évolution des systèmes, notamment pour le suivi des produits sensibles tels que le transport du sang. Cela permet d'assurer la traçabilité en temps réel mais également de surveiller des contraintes fortes pour ces produits comme la température de conservation.

1.3.5 Phase d'évaluation a posteriori du planning

La phase d'évaluation a posteriori correspond finalement à une évaluation de ce qui s'est déroulé pendant la phase d'exécution en temps réel. Son objectif est de donner au planificateur le résultat de ses choix précédents. Les mêmes indicateurs que ceux de la phase d'évaluation a priori sont présents. Cependant ici il ne s'agit pas d'une estimation. Cette phase va également permettre d'effectuer les facturations aux différents clients et d'adapter les prix si le service proposé n'est pas rentable. Cette phase permet de donner un historique des plannings réalisés avec les indicateurs correspondant à chacun.

Le constat de cette phase est que l'exécution du planning ne se produit pas comme prévu. Les valeurs des indicateurs initialement prévues dans l'évaluation a priori ne sont pas les mêmes que dans l'évaluation a posteriori. Cela est dû au fait que l'exécution du planning se fait dans un contexte risqué. Le problème est que les risques pouvant impacter un planning ne sont généralement pas pris en compte lors de l'évaluation a priori.

Conclusion

La quantité de marchandises à livrer a fortement augmenté depuis les vingt dernières années et cette augmentation entraîne une utilisation des transports plus importante. Les marchandises peuvent voyager par plusieurs modes de transport avant d'arriver au client final. Le transport routier de marchandises est souvent le dernier intermédiaire de livraison permettant au client d'obtenir la marchandise commandée, selon ses souhaits.

Dans le domaine du transport routier de marchandises, les entreprises sont soumises à une forte concurrence des entreprises. Pour conserver des parts de marché, l'entreprise doit satisfaire au maximum ses clients. Le planificateur doit répondre aux exigences des clients en prenant au mieux en compte les contraintes de l'entreprise de transport. Pour cela, chaque jour le planificateur construit un planning journalier. Celui-ci comprend les activités à réaliser par les conducteurs. Plusieurs propositions de plannings sont créées, évaluées et celle qui répond au mieux aux objectifs au regard des indicateurs est sélectionnée. Cependant les aléas rencontrés au cours des activités peuvent faire que le planning ne se déroule pas tel qu'initialement prévu. Ainsi,

un planning journalier prévisionnel pourra présenter une évaluation différente de l'enchaînement réalisé et potentiellement générer de l'insatisfaction chez le client. Il est donc important de pouvoir s'engager sur le respect des plannings. Les outils utilisés aujourd'hui ne permettent pas de prendre en compte la survenance possible d'aléas dans l'évaluation des plannings.

Au regard de ce constat, la problématique de recherche de ces travaux est ainsi formulée :

Comment aider le planificateur du transport routier de marchandises à choisir un planning dans un contexte risqué ?

Chapitre 2

État de l'art sur les risques et les indicateurs

Introduction

Après avoir présenté, dans le chapitre précédent, le contexte de la planification du transport routier de marchandises, nous allons dresser un bref état de l'art de plusieurs thèmes en lien avec notre problématique : « Comment aider le planificateur à choisir un planning dans un contexte risqué ? »

Précédemment, nous avons formulé le constat que les plannings de transport sont régulièrement perturbés au cours de leur réalisation par des aléas ou risques venant impacter ces différentes activités. L'ensemble de ces risques représente le contexte incertain de la planification. Nous allons présenter, dans ce chapitre, la notion de risque et décrire le processus de management de risques permettant de les identifier, les évaluer et les traiter. Plusieurs méthodes et outils permettant de prendre en compte les risques seront également présentés et discutés. Cette première partie permet de prendre en compte le contexte incertain lié à la planification.

Un des objectifs de ces travaux de thèse est de faciliter l'identification et l'évaluation des risques sur un ensemble de planning se réalisant dans un même contexte. Du fait de contraintes de délai fortes pour réaliser ces activités et du nombre potentiellement élevé de plannings différents à évaluer, nous souhaitons automatiser ces étapes d'identification et d'évaluation des risques. Ainsi, le planificateur pourra se concentrer sur la sélection du ou des plannings les plus adaptés à ses objectifs. Pour cela et afin d'aider le planificateur, nous présentons une analyse des indicateurs permettant de qualifier un planning dans un contexte incertain.

Cette étude des indicateurs sera réalisée dans l'optique de proposer des indicateurs adaptés au domaine du transport routier de marchandises. Une attention particulière sera portée à la capacité de ces indicateurs à prendre en compte une évaluation a-priori des risques pouvant impacter un planning.

2.1 La notion de risque

Le planning d'une tournée est une représentation des différentes activités à mener pour effectuer les livraisons répondant aux commandes passées par les clients. Les ressources mobilisées (véhicule, conducteur) pour réaliser ces activités sont également représentées sur le planning journalier. Un projet tel que défini par ISO 10006 *est un processus unique, qui consiste en un ensemble d'activités coordonnées et maîtrisées comportant des dates de début et de fin, entrepris dans le but d'atteindre un objectif conforme à des exigences spécifiques.*

C'est ainsi que la représentation d'un planning de tournée peut utiliser des formalismes similaires à ceux utilisés pour représenter un planning d'un projet. Pour définir la notion de risque dans un planning de tournée nous allons nous intéresser à la notion de risque en projet et plus spécifiquement à la modélisation des risques en lien avec les plannings de projet.

2.1.1 Définitions

Aujourd'hui, de plus en plus de termes visent à être normalisés. Cela permet d'assurer une communauté de langage entre les différents acteurs qui utilisent ces termes, qu'ils soient issus du monde industriel ou du monde académique. Ces standards sont exprimés sous la forme de normes. Dans le domaine du management des risques, la norme ISO31000 (2018) propose, entre autres, une définition du terme risque. La définition du risque proposée dans cette norme est la suivante : « effet de l'incertitude sur les objectifs ». L'effet est considéré comme : « un écart par rapport à un attendu. Il peut être positif, négatif ou les deux à la fois, et traiter, créer ou entraîner des opportunités et des menaces. »

Au cours de l'histoire, de nombreux auteurs ont proposé des définitions du terme risque. Selon Lowrance (1976), le risque est caractérisé par la mesure de la probabilité et le poids des conséquences indésirables. Pour Kaplan et al. (1981), le risque est caractérisé par un triplet (si, pi, ci) , où si correspond à un des scénarios du risque, pi à la probabilité de ce scénario, et ci est la conséquence du scénario si . Le risque est l'expression d'influence et la possibilité d'un accident au sens de la gravité de l'accident potentiel et de la probabilité de l'événement (MIL-STD-882D, 2000). Le bilan de ces définitions est que quelque soit la définition, les auteurs cherchent à caractériser la probabilité d'apparition de l'événement ainsi que les conséquences de celui-ci soit en parlant de gravité, de poids, d'impact...

Gourc (2006) fait référence à la performance et présente le risque comme : « la possibilité que survienne un événement dont l'occurrence entraînerait des conséquences (positives ou négatives) sur la performance du système. Un risque est caractérisé par au moins deux dimensions : sa probabilité et la mesure de ses effets potentiels ». Cette vision du risque est reprise par Rongier (2012) qui l'applique à la gestion de la réponse à une crise permettant de proposer un système d'aide à la décision basé sur la performance.

Cette vision du risque avec deux dimensions peut également être observée dans l'ouvrage « La gestion des risques » (Desroches, 2015). Pour l'auteur, le risque est

« une grandeur à deux dimensions ». La première dimension est la probabilité qui donne une mesure de l'incertitude que l'on a sur la deuxième dimension, nommée la gravité, qui donne les conséquences, en termes de quantité de dommages de l'événement redouté.

Selon Sotic et al. (2015), qui font une revue de la littérature des définitions d'un risque, les définitions de risques couramment utilisées dans la pratique peuvent être classées en plusieurs groupes, dans lesquels le risque est exprimé. Les trois groupes proposés par Sotic et al. (2015) sont :

- par moyenne d'incertitudes et de valeurs attendues ;
- événements / conséquences et incertitudes ;
- en relation avec les objectifs.

Le premier groupe fait référence au risque d'incertitude et à la notion que les valeurs prévisionnelles des impacts ne sont pas forcément celles qui sont mesurées lors de la réalisation d'un projet. Le deuxième groupe fait référence au risque événement, c'est à dire qu'un événement vient perturber le projet et va donc avoir un impact sur celui-ci. Le dernier groupe est une restriction de la partie objectif des deux premiers groupes. La différence est que l'intérêt de l'étude du risque porte uniquement sur l'objectif du projet. Si la valeur estimée n'est pas la bonne et que cela n'a aucune conséquence sur l'objectif, alors ce n'est pas pris en compte par ce dernier groupe. De la même manière, si un événement impacte un projet mais que l'impact ne modifie pas l'objectif observé, alors ce risque n'est pas présent dans ce groupe.

Pour l'application au transport routier de marchandises, en accord avec la norme ISO31000 (2018), nous pensons que le risque peut être considéré comme l'effet de l'incertitude sur les objectifs. La conservation des deux dimensions est primordiale pour décrire un risque. Car il faut avoir la possibilité de caractériser l'événement potentiel ainsi que les conséquences de celui-ci. Nous utiliserons donc la probabilité comme étant la mesure d'occurrence d'un risque ou de l'événement associé et l'impact comme étant la mesure des effets potentiels du risque.

Connaître les risques est un atout pour l'élaboration d'un projet car il permet d'identifier les différents événements pouvant le perturber. Il est donc primordial d'anticiper les risques. Cela nous amène à la notion de management des risques.

2.1.2 Processus de management des risques

Le management des risques peut apporter une aide précieuse à la gestion de projet. Cela doit permettre au décideur de prendre les bonnes décisions. Aujourd'hui, selon ISO31000 (2018), le processus de management des risques est défini comme « les activités coordonnées dans le but de diriger et piloter un organisme vis-à-vis du risque ». Pour cela, le management des risques se base sur un processus. Dans la littérature, aussi bien dans le domaine industriel que dans le domaine académique, les méthodes de gestion des risques se réfèrent à un processus standard présentant des étapes bien connues (BSI, 2000 ; I. ISO31000, 2009 ; PMBOK, 2013) :

- identification des risques ;

-
- évaluation des risques ;
 - traitement des risques ;
 - suivi des risques.

Au sein du processus de management des risques, l'étape d'identification des risques a pour objectif d'élaborer une liste ou une base de données des risques liés aux projets d'une entreprise. Pour que cette base de données soit la plus complète possible, il est conseillé de solliciter la plus grande diversité d'acteurs possibles, compétences et expertises complémentaires, afin de couvrir l'ensemble des aspects de l'activité.

L'étape d'évaluation des risques a pour objectif de caractériser chacun des risques précédemment identifiés. Cela consiste à estimer l'occurrence d'apparition d'un risque ainsi que son niveau d'impact. Cette évaluation peut utiliser des échelles de valeur quantitative ou qualitative (symbolique). Une évaluation quantitative revient à donner une valeur numérique à chacune des dimensions du risque : par exemple l'impact peut être évalué en nombre de jours de retard. Une évaluation qualitative s'appuie sur une échelle (par exemple Faible, Moyen, Fort, Très fort) pour l'évaluation de la gravité et de l'occurrence. A partir de ces évaluations, il est possible de construire une matrice de gravité/occurrence dans laquelle l'ensemble des risques sont répertoriés selon ces deux dimensions. Pour illustrer cela, prenons deux échelles de valeurs à quatre dimensions, la matrice résultante contient seize cases par la combinatoire des quatre possibilités pour la gravité et des quatre possibilités pour l'occurrence. Il est également possible de calculer un niveau de criticité, attribué à chaque case, pour déterminer la hiérarchisation des risques.

L'étape de traitement des risques a pour objectif de définir les actions pour diminuer l'occurrence et/ou l'effet qui se produit sur le projet. Généralement, comme il est rarement possible de traiter l'ensemble des risques identifiés, la hiérarchisation permet de sélectionner les risques les plus critiques, pour lesquels il est primordial d'identifier des actions de traitement. Dans cette phase, les traitements correspondent à la mise en place d'actions préventives et d'actions correctives.

La dernière étape correspond au suivi des risques. Son objectif consiste à observer quel risque impacte le projet en temps réel et d'assurer un suivi des actions de traitement programmées en vérifiant leur pertinence et leur efficacité. Lors de cette phase, des actions de traitements correctifs peuvent également être appliquées pour diminuer l'impact des risques.

Ces étapes génériques d'un processus de management des risques font appel à diverses méthodes ou outils pour être réalisées. Dans la section suivante, nous allons nous intéresser à quelques-unes d'entre elles.

2.1.3 Exemples de méthodes pour outiller le processus de management des risques

Dans cette section, nous allons présenter quelques exemples de méthodes dédiées principalement aux phases d'identification et d'évaluation des risques dans le processus de management des risques.

Concernant la phase d'identification des risques, la plupart des méthodes développées s'appuient sur le retour d'expérience des experts, l'analyse des cas passés et la réalisation d'interviews. Voici quatre grandes méthodes connues pour l'identification des risques :

- QQQQCPC ;
- Brainstorming ;
- Delphi ;
- Nominal Group Technique (NGT).

Selon Canonne et al. (2013), la méthode QQQQCPC permet de récupérer l'ensemble des informations d'un sujet étudié. Bertoluci (2001) qualifie cette méthode de « technique de recherche d'informations sur un problème et ses causes » permettant de bâtir un plan d'action par la suite. Cette méthode consiste à poser les questions : Quoi ?, Qui ?, Où ?, Quand ?, Comment ?, Pourquoi ? et Combien ? La méthode permet, par sa structure détaillée de questions, d'aborder les différents aspects d'un sujet à traiter. Toutefois cette méthode est consommatrice de temps pour pouvoir traiter l'ensemble des sujets et des risques pouvant impacter un planning.

La méthode de Brainstorming a pour objectif de tirer parti de la créativité des participants (Isaksen, 1998). Cette méthode consiste en un partage massif d'idées par chaque participant sans qu'il n'y ait de critique formulée par les autres participants. Les trois phases sont la définition du sujet, l'animation pour la création des idées et l'exploitation des idées. L'étape ultime est la sélection d'idées que l'on souhaite conserver pour le projet. Selon Litcanu et al. (2015), cette méthode a de nombreux avantages comme la rapidité d'action, le développement de la créativité, l'adaptation au travail en équipe mais également le fait que cette méthode est applicable dans tous les domaines. Cooper et al. (2005) précisent que l'ensemble des parties prenantes peut participer à cette méthode car cela permet de traiter le problème selon plusieurs visions.

La méthode Delphi consiste à rassembler un certain nombre d'avis d'experts sur un sujet précis. Elle permet d'effectuer la phase d'identification mais également la phase d'évaluation des risques. Cette méthode consiste à demander aux experts de renseigner un questionnaire anonyme sans qu'ils puissent se concerter entre eux. L'objectif est de présenter les résultats aux experts après une première analyse pour exposer les opinions qui divergent et leur permettre de justifier leurs points de vue sur la question. Après plusieurs itérations, les arguments doivent permettre de converger vers un accord commun entre les différents experts. Woudenberg (1991) explique que la limite de cette méthode porte sur le fait que la discussion entre les participants est restreinte. Quant à eux, Kea et al. (2015) expliquent que la méthode Delphi se focalise uniquement sur la vision globale et ne permet pas un travail détaillé sur un sujet.

La méthode NGT est un processus de groupe impliquant l'identification des problèmes, la production de solution, et la prise de décision. La méthode est composée de cinq étapes : introduction et explication du but et de la procédure de la réunion, imagination silencieuse d'idées, partage des idées, discussion de groupe, vote et classement. L'application à l'identification des risques conduit chacun des participants :

à produire une réflexion personnelle permettant d'exposer les risques et à partager les risques identifiés où l'animateur expose l'ensemble des propositions. Sur cette base, une discussion de groupe permettant les échanges et une clarification des idées est réalisée pour arriver à un vote et classement des idées pour converger vers une priorisation des risques. Murphy et al. (1998) exposent que cette méthode présente un avantage par rapport à la méthode Delphi résidant dans la discussion qui permet d'enrichir la réflexion et de croiser les avis. Cette méthode nécessite un nombre de participants important.

Le contexte industriel étant complexe, de nombreuses méthodes ont été créées pour répondre aux besoins des entreprises dans le management des risques. Tixier et al. (2002) proposent une classification de 62 approches existantes. La classification distingue les méthodes déterministes et/ou probabilistes, mais également les méthodes qualitatives ou quantitatives. Par la suite, il classifie également ces différentes méthodes en fonction des données d'entrées nécessaires à la méthode. A partir de cette étude, il en conclut sept classes de données d'entrées présentées ci-dessous :

- Les plans ou schémas sont liés à la description du site, de l'installation, des unités, des réseaux de fluides, des barrières de sécurité et des stockages ;
- Le processus et les réactions sont liés à la description des opérations et des tâches, aux caractéristiques physiques et chimiques du processus, aux paramètres cinétiques et calorimétriques, aux conditions de fonctionnement et aux conditions de fonctionnement normales ;
- Les substances sont liées au type de substance, aux propriétés physiques et chimiques, aux quantités et aux données toxicologiques ;
- La probabilité et la fréquence sont liées au type de défaillance, à la probabilité et à la fréquence de défaillance, à la défaillance humaine, au taux de défaillance et à la probabilité d'exposition ;
- La politique et la gestion concernent la maintenance, l'organisation, la politique de sécurité, le système de gestion de la sécurité, la gestion des transports et le coût des équipements ;
- L'environnement est lié à l'environnement du site, aux données topographiques et à la densité de population ;
- Le texte et les connaissances historiques sont liés aux normes et règlements, ainsi qu'aux connaissances historiques.

Gourc (2006) propose une grille de lecture différente, classifiant les approches de gestion des risques suivant qu'elles soient symptomatiques ou analytiques. Le premier groupe d'approches, aussi appelées risque-incertitude, est associé à des approches où la gestion des risques du projet se transforme en gestion des incertitudes (Ward et al., 2003). Le second groupe d'approches considère le risque comme un événement pouvant influencer sur la réalisation des objectifs du projet (Carter et al., 1996).

Parmi les nombreuses méthodes prenant en charge la totalité du processus de management des risques, nous avons décidé de présenter quatre des méthodes les plus connues :

- APR ;

- AMDEC;
- HAZID;
- HAZOP.

Les présentations des méthodes sont inspirées des travaux de Cooper et al. (2005), Desroches (2015) et Ventroux (2016).

APR (Analyse Préliminaire des Risques) est une technique d'identification et d'analyse de la fréquence du danger qui peut être utilisée lors des phases en amont de la conception pour identifier les dangers et évaluer leur criticité.

L'AMDEC (Failure Modes, Effect and Criticality Analysis) est utilisée dans la démarche qualité et dans le cadre de la sûreté de fonctionnement. Elle identifie les modes de défaillance, les causes et les conséquences éventuelles de chaque mode et aide à l'évaluation de la criticité.

L'HAZID (Hazard identification) est une démarche de recherche des risques de tous types et de vérification que des mesures de maîtrise des risques ont bien été prises. Cette méthode est orientée sur la maîtrise des risques identifiés à partir d'indicateurs.

L'HAZOP (Hazard and operability) consiste à s'intéresser aux déviations des divers paramètres physiques comme la température, la pression, la concentration ... C'est une méthode particulièrement utilisée dans l'analyse de la sécurité des industries de process (chimique, pharmaceutique, pétrolière...). L'objectif est de présenter les causes et les conséquences des risques mais également de proposer des moyens de détection et de protection.

Depuis plusieurs années, le laboratoire du Centre de Génie industriel à IMT Mines Albi réalise des travaux relevant de la thématique de l'analyse et maîtrise des risques dans le management des projets et processus. Ces travaux ont conduit au développement de propositions originales basées sur le modèle ProRisk (Marmier et al., 2014; Marmier et al., 2013; Nguyen et al., 2013). Ces travaux s'appuient sur le constat que l'évaluation indépendante des risques ne permet pas de refléter la réalité. Ils visent à prendre en compte l'ensemble des combinaisons de survenue des risques et leur influence sur les plannings, considérant qu'un processus ou projet sera généralement impacté par plusieurs risques au cours de sa réalisation. Chaque combinaison de risques correspond à un scénario de risque. Ces scénarios ainsi générés sont évalués selon plusieurs critères comme leur probabilité d'occurrence, la durée, le coût, mais encore la possibilité d'ajouter un critère spécifique au type de planning évalué.

Les représentations d'un planning de projet et d'un planning de tournées sont très similaires, ils peuvent tous les deux être modélisés par des réseaux d'activités. Les concepts et les outils logiciels développés par le laboratoire de recherche (Centre de Génie industriel à IMT Mines Albi) depuis quelques années sur la gestion des risques des projets sont tout à fait pertinents pour évaluer les risques dans les plannings de transport.

L'ensemble des travaux de cette thèse va s'intéresser aux risques événements. La représentation des risques impactant un planning peut être assimilée à un événement

perturbant la planification dans le contexte du transport routier de marchandises. Dans l'objectif d'aider le planificateur à choisir un planning, notre intérêt porte sur les deux premières phases du processus de management des risques : l'identification et l'évaluation des risques. Ces deux phases interviennent en amont de la réalisation du projet ou de la tournée, cela permet de donner une vision prévisionnelle des différents risques et de leurs impacts sur le planning. Un premier constat est que la réalisation des phases d'identification et d'évaluation des risques sur un projet nécessitent un laps de temps assez long. Or, dans le contexte du transport routier de marchandises, le planificateur ne dispose que de très peu de temps pour construire et sélectionner un planning pour la journée du lendemain. Le planificateur peut hésiter entre plusieurs plannings, l'application des méthodes nécessiterait d'effectuer plusieurs fois l'identification et l'évaluation des risques alors que le contexte dans lequel se trouvent les différents plannings est le même. C'est ainsi, que plutôt que d'effectuer ces phases de manière manuelle, nous souhaitons proposer une automatisation de l'identification et de l'évaluation des risques à partir des éléments connus du contexte dans lequel les tournées sont effectuées.

Cette réflexion sur le contexte nous amène à nous intéresser aux différents types de risques impactant un planning dans le transport routier de marchandises.

2.1.4 Les risques dans le transport routier de marchandises

Les systèmes de transport sont constamment soumis à des perturbations (Andersson et al., 2017) qui peuvent avoir un impact négatif sur les différentes activités du système de transport. Comme indiqué dans plusieurs articles (Andersson et al., 2017 ; Leobons et al., 2019 ; Mattsson et al., 2015 ; Rodrigue, 2017 ; Rodrigue et al., 2016), de nombreuses perturbations peuvent se produire dans le domaine du transport comme par exemple la défaillance de certains équipements (véhicule, moyen de manutention) ou la saturation du réseau routier. Mattsson et al. (2015) proposent une distinction utile entre les causes internes et externes des perturbations et entre les événements accidentels et les interférences intentionnelles. Nous reprenons cette classification pour structurer la table 2.1. Dans cette table, nous illustrons quelques exemples de causes de perturbations à partir des travaux de plusieurs auteurs (Andersson et al., 2017 ; Mattsson et al., 2015 ; Rodrigue, 2017 ; Rodrigue et al., 2016).

Cette section a permis, en fonction du contexte du transport routier de marchandises, de nous positionner sur les risques événements venant de la catégorisation de Gourc (2006). La définition d'un risque comme étant « un effet de l'incertitude sur les objectifs » correspond bien au risque du transport routier de marchandises. Nous utiliserons les dimensions de probabilité et d'impact pour décrire les risques impactant le planning.

La problématique de cette thèse : Comment aider le planificateur à choisir un planning dans un contexte d'incertitude ? nous a permis à l'aide de la revue de littérature des risques d'en extraire une première question de recherche. La question de recherche que nous allons traiter est donc :

Table 2.1 – Catégorisation des causes de perturbation d'un système de transport selon Mattsson et al. (2015)

	Événement accidentel	Interférence intentionnelle
Interne	Accidents causés par le personnel	
	Échecs techniques, Composants cassés	
	Constructions défectueuses	
	Surcharge	Conflit du marché du travail
	Accident de conducteur	Sabotage
	Perte d'objet	Erreur de planification
	Indisponibilité des équipements de maintenance	
	Personnel non disponible	
	Entrepôt saturé	
	Zone de déchargement occupée	
Externe		Farces, Sabotage, Vol
	Catastrophes naturelles	Actions terroristes
	Accidents de la route	Embouteillage
	Défaillance des infrastructures	Congestion
	Maintenance des infrastructures	Évènements sportifs, culturels
	Émeutes	

« Comment identifier automatiquement les risques associés à un planning journalier et comment évaluer automatiquement leurs impacts sur le planning? »

Maintenant nous allons nous intéresser à la notion d'indicateur pour aider le choix du planificateur.

2.2 Évaluation de la résistance d'un planning

Un autre aspect de nos travaux de thèse porte sur la capacité d'évaluer et de comparer plusieurs plannings journaliers possibles. Cette évaluation doit permettre de donner au planificateur des indications sur les caractéristiques intrinsèques du planning mais également sur sa capacité à maintenir un bon niveau de qualité vis-à-vis des clients malgré la survenue de perturbations.

Pour évaluer la résistance d'un planning dans le transport routier de marchandises, nous allons dans un premier temps nous intéresser aux systèmes classiques utilisés pour l'évaluation d'un planning. Ces systèmes sont généralement basés sur la construction de fonctions objectives axées sur certains critères. La deuxième partie est consacrée à une présentation de différents indicateurs utilisés pour caractériser les systèmes de livraison dernier kilomètre. Une fois ces différents critères présentés, nous allons présenter quelques indicateurs pour caractériser la résistance d'un planning dans un contexte risqué. Nous nous intéresserons en particulier à l'indicateur de robustesse.

2.2.1 Système classique d'évaluation

A l'origine, dans le problème de tournée de véhicule tel que décrit par Dantzig et al. (1959) « truck dispatching problem », l'objectif visé est de trouver une solution. Cette solution correspond à un planning permettant de définir les différents trajets à réaliser pour livrer l'ensemble des clients. Ensuite, les auteurs se sont intéressés à chercher des solutions optimales au regard de différents critères comme le temps de réalisation, le nombre de véhicules... Avec les évolutions des travaux de recherche, les critères sont devenus de plus en plus nombreux (Kovacs et al., 2015). Le critère économique n'étant plus le seul intérêt, on peut observer dans la littérature des travaux de recherche s'intéressant à répondre à deux objectifs en même temps. Demir et al. (2014) proposent une résolution bi-objective du problème de tournée de véhicule en utilisant un critère économique (le temps de conduite) et un critère environnemental (la consommation de carburant).

Le nombre de critères que les auteurs cherche à satisfaire est de plus en plus nombreux : les approches de résolution du problème de tournée de véhicule se sont orientées vers des optimisations multi-objectives (Bahri et al., 2016 ; Chebbi et al., 2015). L'ensemble des optimisations multi-objectives cherche une solution sur le front de Pareto. Pour cela, chaque critère est représenté sous la forme d'une fonction $f_i(x)$ dont l'objectif est de la minimiser. A chaque fonction est associé un poids w_i . Ce poids correspond à l'importance du critère par rapport à la solution finale. Plus un poids est élevé, plus l'objectif est important. Une fois que tous les objectifs sont traduits sous la forme d'une fonction avec un poids associé, l'objectif est donc de minimiser la globalité c'est-à-dire de trouver le minimum de la fonction objective globale tel que présentée dans l'équation 2.1.

$$FonctionObjective = \sum w_i * f_i(x) \quad (2.1)$$

Nous allons nous intéresser maintenant aux indicateurs qui peuvent être utilisés dans les fonctions objectives pour l'évaluation d'un planning.

2.2.2 Indicateurs dans le domaine du transport

Dans la logistique, selon Chow et al. (1994), « la performance peut être vue comme un sous-élément de la notion élargie de la performance de la firme ou de l'organisation ». Il décompose la performance en 12 catégories complémentaires pour une meilleure analyse :

- la croissance des ventes ;
- le rapport coût-efficacité ;
- tenir ses promesses ;
- les faibles pertes et dégâts ;
- la rentabilité ;
- la responsabilité sociale ;

- le "juste" prix des intrants ;
- la flexibilité ;
- les délais de livraison respectés ;
- la sécurité d'emploi et les conditions de travail ;
- la satisfaction client ;
- la disponibilité des produits.

Pour le transport routier de marchandises, Patier et al. (2010) proposent une liste d'indicateurs globaux :

- Ratio de livraisons/enlèvements ;
- Densité de livraisons/enlèvements dans une zone ;
- Intensité de livraisons/enlèvements d'un secteur d'activité dans une zone ;
- Durée de livraisons/ enlèvements en double file pour livrer ou enlever un secteur d'activité dans une zone ;
- Distance moyenne parcourue pour livrer ou enlever un secteur d'activité avec un type de véhicule ;
- Longueur de la marche d'approche de la plate-forme au lieu de livraison ;
- Distance moyenne nécessaire pour livrer/enlever ;
- Distance totale parcourue dans l'aire urbaine par les véhicules de marchandises ;
- Durée moyenne d'une livraison/enlèvement (par secteur d'activité, type de véhicule, mode de gestion) ;
- Vitesse moyenne par tournée (comprenant ou excluant les arrêts pour livrer) ;
- Poids transporté au kilomètre par trajet selon le secteur d'activité, le type de véhicule, le mode de gestion ;
- Consommation d'énergie, pollution, effet de serre selon la zone, le véhicule, l'activité, le mode de gestion (totale ou par mouvement).

Les indicateurs proposés par Patier et al. (2010) s'appliquent au domaine du transport pris dans son acception la plus large. De ce fait, ils ne permettent pas d'adresser les spécificités du transport routier de marchandises dernier kilomètre. Meier et al. (2013) proposent une liste d'indicateurs complémentaires permettant l'évaluation d'indicateurs de la livraison du dernier kilomètre. Ces indicateurs ont pour finalité l'évaluation de la performance d'un planning. Ceux de Meier et al. (2013) sont présentés dans la table 2.2.

Cette section a permis de voir que de nombreux indicateurs sont utilisés pour l'évaluation d'un planning. Les indicateurs dépendent de l'utilisation que souhaitent en faire les auteurs. Une grande partie est des indicateurs économiques, mais l'indicateur de satisfaction client n'est pas négligé dans la littérature. Certains auteurs comme (Fan, 2011 ; Meier et al., 2013 ; Zhang et al., 2012) considèrent l'indicateur de la satisfaction client comme un élément déterminant pour sélectionner une solution. En revanche, d'autres auteurs (Geetha et al., 2013 ; Goel et al., 2013 ; Vidal, 2013) considèrent que satisfaire un client est une contrainte forte à respecter dans la planification, une solution proposée correspondra à une satisfaction client de 100%.

Maintenant que les indicateurs du transport routier de marchandises sont présentés, il faut s'intéresser aux indicateurs qui se préoccupent de l'impact des risques sur un planning dans l'objectif de mesurer des modifications potentielles. Lorsque ces modifications sont connues, elles peuvent impacter le choix du planificateur lors de la sélection d'un planning. L'objectif est donc de trouver un indicateur permettant d'être représentatif du planning qu'il souhaite sélectionner lors de perturbations.

2.2.3 Indicateur pour exprimer la résistance aux perturbations : la robustesse

Les entreprises de production de biens ainsi que les entreprises de production de services sont exposées à des perturbations plus ou moins imprévisibles, comme des changements de la demande client, des problèmes de disponibilité des matières premières ou des ressources. Pour faire face à ces perturbations, les décideurs / managers doivent anticiper l'impact des perturbations, dans le respect de la performance et de la rentabilité. Pour cela, ils doivent mettre en place des procédures ou des systèmes capables d'anticiper les perturbations. Lorsqu'il s'agit d'indicateurs permettant de mesurer l'impact de la perturbation sur un système, deux indicateurs sont souvent utilisés : la résilience et la robustesse.

La mesure du respect des exigences demandées à un système et de l'efficacité des mesures de performances prises en compte nécessite de mettre en place et de suivre des indicateurs spécifiques. De nombreux travaux de recherche (Ibanez et al., 2016 ; Pavard et al., 2009 ; Urruty et al., 2016) traitent de ce sujet et proposent divers indicateurs comme ceux permettant de mesurer la robustesse, la résilience, la stabilité du système. Pavard et al. (2009) indiquent que ces notions sont devenues centrales dans de nombreux domaines scientifiques allant de l'informatique à la biologie en passant par l'écologie ou la finance. Dans le domaine de l'agriculture, Urruty et al. (2016) présentent une revue de la littérature des termes de stabilité, robustesse, vulnérabilité et résilience. Cette revue de la littérature permet de clarifier l'utilisation du mot robustesse dans l'agriculture. Il conclut en précisant que la robustesse est un concept qui va au-delà de la stabilité grâce à une description plus précise des interactions entre les systèmes agricoles (et leurs différentes composantes) et des modifications des conditions environnementales. Dans Urruty et al. (2016), les auteurs définissent la robustesse comme la « capacité à maintenir les niveaux souhaités de production agricole malgré la survenue de perturbations ». Selon Urruty et al. (2016) la résilience est la « capacité à absorber les changements et à anticiper les perturbations futures grâce à la capacité d'adaptation ».

Au regard de ces deux premières définitions, un travail, présenté dans Clément et al. (2018), a permis de comparer les définitions de robustesse et de résilience. L'article propose une comparaison des définitions relevées dans des articles référencés dans la base de données scientifique Web of Science (WOS) et utilisant les mots résilience et robustesse dans leur titre. Il est relevé que certains auteurs mélangent les définitions de robustesse et de résilience. D'un point de vue général, la notion de robustesse fait référence à la capacité d'un système à résister, à maintenir un état malgré un

ensemble de perturbations, tandis que la notion de résilience fait référence à la capacité d'un système à absorber et à s'adapter après la perturbation.

Pour le contexte du transport routier de marchandises et à la vue de ces premières analyses, notre choix est d'étudier la robustesse d'un planning car l'objectif est d'observer si les risques impactant un planning vont le modifier et quelles en sont les conséquences.

Selon Bradley (1978), le terme robustesse a été utilisé dans les années 1950 dans le domaine des mathématiques où de nombreux auteurs l'utilisent pour évaluer leur système selon différents tests effectués. Selon Bradley (1978), « la généralisation excessive, la sous-qualification ou l'utilisation d'un langage trop exubérant des auteurs de la littérature dans la proclamation de la robustesse tendrait davantage à donner l'impression que la robustesse est un phénomène très général », la définition de la robustesse est souvent utilisée qualitativement et les auteurs l'adaptent comme bon leur semble.

Pour compléter le travail présenté dans Clément et al. (2018), un travail complémentaire s'est intéressé aux auteurs utilisant les termes robustesse et résilience en élargissant la recherche à d'autres bases de données (WOS, Science Direct, Taylor and Francis, Springer, Wiley et PsycArticles). Ce travail propose l'analyse de 113 articles et montre que le terme robustesse est utilisé dans de nombreux domaines comme l'ingénierie, l'informatique mais également la biologie, les sciences sociales ou la psychologie. Ce travail a permis d'identifier trois types de robustesse permettant de catégoriser l'ensemble des définitions utilisées pour la robustesse.

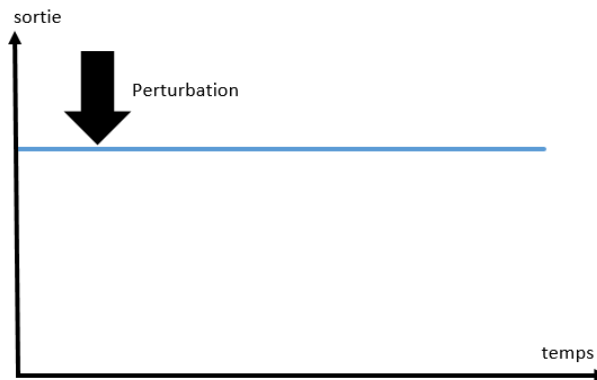


Figure 2.1 – Robustesse Type 1

Le premier type de robustesse (figure 2.1) montre une invariance totale face aux perturbations, le second type de robustesse (figure 2.2) montre que le système est robuste s'il reste dans une zone acceptable après une perturbation et le troisième type de robustesse (figure 2.3) fait une différence sur l'étude du système. Le système est décomposé en fonction principale et en fonctions secondaires. Lors de la perturbation, le système est considéré comme robuste s'il y a une invariance de la fonction principale.

Maintenant que la robustesse est présentée de façon globale, c'est-à-dire dans l'ensemble des domaines, nous allons présenter la robustesse dans la planification et plus précisément dans le transport routier de marchandises.

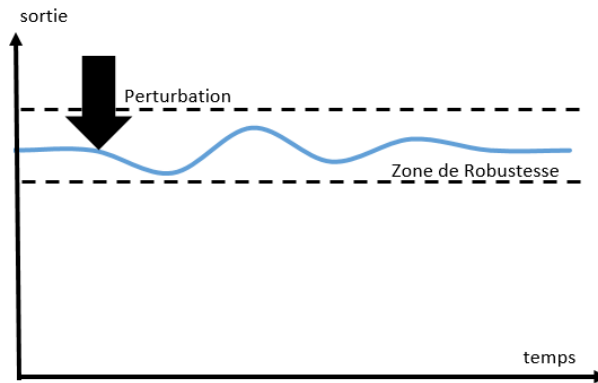


Figure 2.2 – Robustesse Type 2

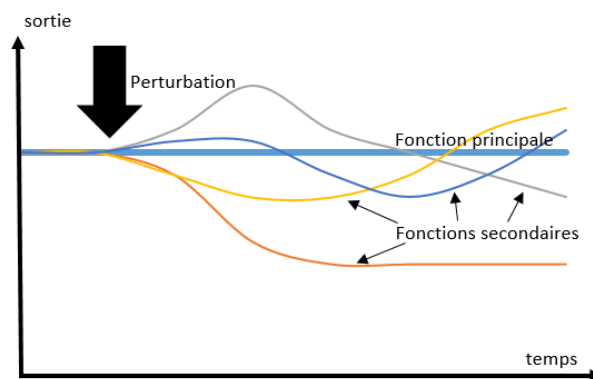


Figure 2.3 – Robustesse Type 3

Dans le domaine de la planification, la robustesse est souvent utilisée. Cependant l'utilisation n'est pas faite pour l'évaluation du planning mais en majorité pour l'évaluation de l'algorithme qui a généré la solution. Chen et al. (2019), Dunlop et al. (2019) et Thaman et al. (2017) parlent d'optimisation robuste ou d'algorithme de planification robuste. Cela signifie que pour un jeu de données, l'algorithme doit proposer la même solution.

Pour le domaine du transport routier de marchandises ou du VRP (Vehicle Routing Problem), la littérature se positionne majoritairement sur la robustesse des algorithmes également. Cependant pour Agra et al. (2013) et Wu et al. (2017) la robustesse de leur algorithme cherche à résoudre les VRP avec fenêtre de temps donc ils se placent dans l'incertitude des temps de trajet. Sungur et al. (2008) s'intéressent au VRP à capacité limitée donc ils cherchent à être robuste en fonction de l'incertitude des quantités de marchandises à livrer.

D'autres auteurs (Iris et al., 2019 ; Liebchen et al., 2009) proposent une autre vision de la robustesse qu'ils appellent robustesse récupérable. Liebchen et al. (2009) parlent de la robustesse récupérable correspondant à une nouvelle approche de la robustesse qui, brièvement, « considère un problème nominal avec des scénarios et des possibilités de récupération. Une solution au problème nominal est récupérable de manière robuste si, quel que soit le scénario, elle peut être restaurée aux données initiales ».

Dans le transport routier de marchandises, plusieurs sens donnés au terme de robustesse sont utilisés. La robustesse sur la prise en compte des risques pouvant impacter un planning n'est pas présente dans ce domaine. Pour la mise en place d'indicateurs de robustesse, il faut s'intéresser à comment construire un indicateur de robustesse.

McPhail et al. (2017) proposent une méthode pour le calcul de différentes métriques de robustesse. Pour lui, la robustesse peut être introduite en effectuant la transformation globale de la métrique de performance $f(x_i, S)$ jusqu'à une métrique de robustesse $R(x_i, S')$ par trois transformations distinctes

- La valeur de performance de la transformation (Trans1) ;
- La sélection de sous-ensembles de scénarios (Trans2) ;
- Le calcul de la métrique de robustesse (Trans3).

La figure 2.4 représente la schématisation des différentes transformations pour obtenir des métriques de robustesse selon McPhail et al. (2017). Le haut de la figure représente les différentes décisions alternatives x_i possibles. L'ensemble de ces décisions va donc présenter des scénarios différents notés selon McPhail et al. (2017) s_i . Pour chaque scénario, des indicateurs de performance peuvent être calculés, ils sont notés $f(x_i, s_i)$. La performance de tous les scénarios va subir les différentes transformations (Trans1, Trans2 et Trans3) pour enfin obtenir des métriques de robustesse.

Cette section a permis d'exposer les différents indicateurs présents dans le transport de marchandises, puis de s'intéresser aux indicateurs prenant en compte les risques perturbant un planning. Notre choix s'est focalisé sur la robustesse. Au vu de la littérature sur la robustesse, la définition retenue est : la capacité d'un système à maintenir les niveaux souhaités des indicateurs. Au vue du contexte de transport routier de marchandises, l'indicateur de satisfaction client sera celui utilisé dans la suite de la thèse. Au vu de la revue de littérature sur les indicateurs, la question de recherche à laquelle nous cherchons à répondre par la suite est : « Quels indicateurs permettent de caractériser la capacité d'un planning à résister aux perturbations ? »

Conclusion

L'objectif de ce chapitre est de positionner ces travaux par rapport à la notion de risques événements au regard de la difficulté du planificateur à prendre en compte les conséquences possibles d'aléas.

La première partie de ce chapitre est un état de l'art sur les risques. Il nous a permis de nous positionner sur les risques événements permettant de représenter le contexte du transport routier de marchandises. Le processus de management des risques, constitué de quatre étapes, s'avère trop long à dérouler dans le faible temps laissé au planificateur pour produire son planning journalier. La revue de littérature permet d'extraire notre première question de recherche : « Comment identifier automatiquement les risques associés à un planning journalier et comment évaluer leurs impacts sur le planning ? » Pour observer de nombreux plannings proposés pour la même journée, il est nécessaire d'être en mesure d'identifier et d'évaluer les risques.

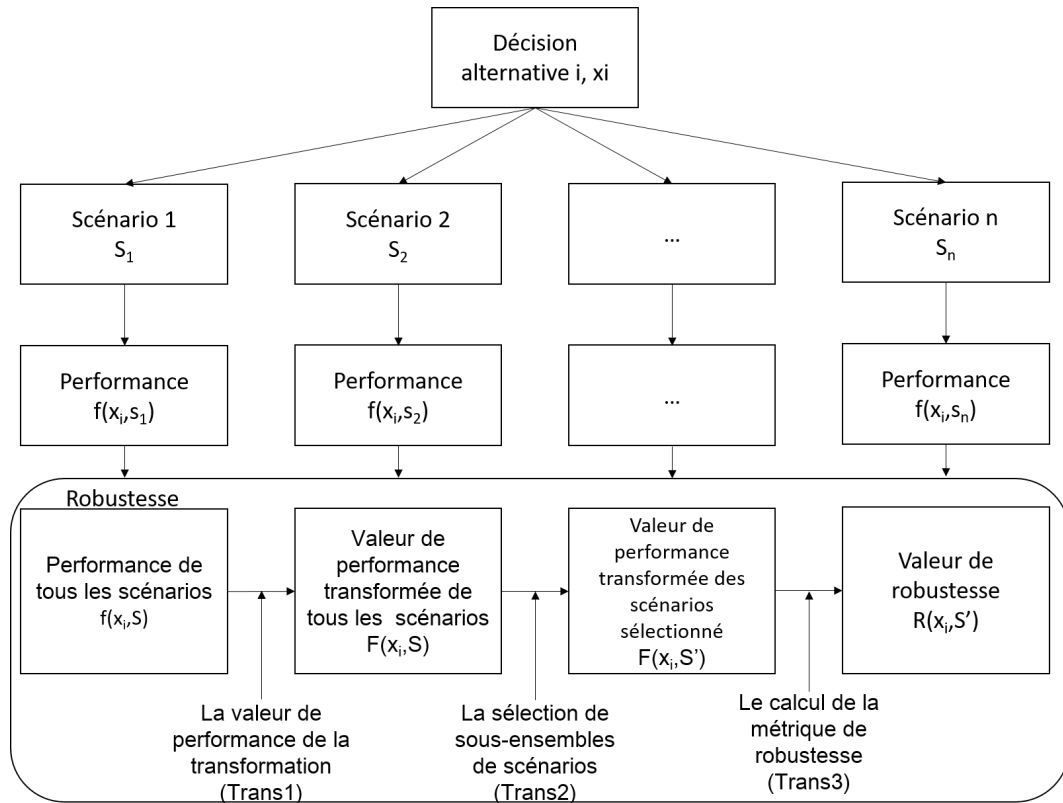


Figure 2.4 – Différentes transformations des métriques de robustesse selon McPhail et al. (2017)

(CC BY-NC-ND 4.0)

La deuxième partie du chapitre s'intéresse aux indicateurs du transport routier de marchandises ainsi qu'aux indicateurs permettant d'évaluer les impacts des risques. La revue de littérature présente les indicateurs de robustesse ainsi qu'une méthode de construction d'indicateurs de robustesse. La notion de robustesse est utilisée dans le transport routier de marchandises. Cependant ils ne s'intéressent pas aux risques pouvant impacter un planning mais plutôt à la notion d'incertitudes de temps ou de quantité. Pour donner une représentation au planificateur dans l'aptitude du planning à être réalisé conformément, il s'agit de définir des indicateurs pertinents. Cette partie clarifie notre deuxième question de recherche : « Quels indicateurs permettent de caractériser la capacité d'un planning à résister aux perturbations ? »

La suite de cette thèse répond aux deux questions de recherche que nous venons de formuler. Le chapitre 3 présente le modèle de données structurant nos propositions qui sont quant à elles présentées dans les chapitre 4 et 5.

Table 2.2 – Indicateurs du transport de marchandises selon Meier et al. (2013)

Indicateur	Signification
Livraison ponctuelle [%]	Proportion de processus de livraison, qui pourraient être terminés dans les délais promis au client.
Délai moyen de résolution du problème [heures]	Uniquement pertinent pour les activités de réparation à délai critique : Délai moyen à compter du moment de la réception du rapport de défaut jusqu'au moment de la validation de la fonction.
Coûts [€]	Coûts globaux encourus pour la prestation de services.
Chiffre d'affaires [€]	Chiffre d'affaires réalisé par prestation de services.
Délai moyen entre les défaillances [jours]	Délai moyen entre les défaillances.
Temps moyen d'immobilisation [jours]	Temps moyen de panne de l'équipement au cours d'une période donnée, par ex. une année.
Proportion de la durée du trajet [%]	Durée moyenne des déplacements par rapport à la durée totale du travail (temps d'exploitation et de déplacement compris).
Utilisation des ressources [%]	Temps de travail des ressources par rapport au temps de disponibilité global de la ressource.
Quota de réacheminement [%]	Nombre de processus de livraison réorganisés après que le client a été averti ou après que les ressources requises ont été réservées par rapport au nombre total de processus de livraison.
Réactivité [heures]	Uniquement pertinent pour les activités de réparation à délai critique : Délai moyen entre le moment de la notification de la panne et le début prévu des activités de réparation.
Taux d'acceptation [%]	Nombre de fois que la date souhaitée par le client pour le processus de livraison a pu être acceptée, en fonction du nombre total de processus de livraison.

Chapitre 3

Notation et modélisation d'un planning dans le domaine du TRM

Introduction

Dans le contexte de la livraison dernier kilomètre, la planification des tournées joue un rôle crucial dans l'organisation de l'activité, pour le respect de la satisfaction des clients et au final le succès de l'entreprise. La planification est le processus que réalise l'entreprise de transport pour organiser les commandes client (les livraisons à réaliser) dans l'objectif de satisfaire les besoins des clients. Ce processus permet d'affecter au mieux chaque livraison à une tournée de livraisons qui est définie pour un couple véhicule-conducteur. De nombreux indicateurs peuvent être construits afin de mesurer la qualité du processus de planification et notamment des tournées établies. Ces indicateurs pourront également permettre de comparer plusieurs tournées.

Ce chapitre est à considérer comme un chapitre de transition entre la présentation de la problématique avec un état de l'art associé et la présentation de nos contributions (chapitres 4 et 5). Le chapitre 4 est consacré à la proposition d'un mécanisme d'identification automatique des risques relatifs à l'exécution des tournées planifiées, d'une part, et à l'évaluation des impacts en cas de survenue de ces risques selon diverses dimensions, d'autre part. Le chapitre 5, quant à lui, a pour objectif de proposer des indicateurs pertinents et innovants pour alimenter la vision du planificateur et lui permettre d'évaluer la robustesse d'une tournée et d'un planning journalier.

Afin de faciliter la présentation et la lecture de ces chapitres de contribution, nous avons introduit ce chapitre visant à poser les éléments de langage, à les structurer autour de notions et concepts et d'en proposer une modélisation sous forme de diagramme de classe.

Ce chapitre présente, dans un premier temps, les différents éléments et concepts nécessaires pour effectuer la planification des livraisons, il s'agit des concepts liés à l'entreprise du transport et au client. Dans un deuxième temps, la présentation d'une procédure de construction de tournée illustre le modèle de données sélectionné. Un mécanisme d'évaluation des plannings met en avant le modèle de données utilisé et

permet de présenter une première vision de l'évaluation de la qualité des plannings générés selon une première liste d'indicateurs. Ce premier mécanisme d'évaluation sera consolidé par la proposition, effectuée dans le chapitre 5, sur les indicateurs de robustesse.

3.1 Structuration des concepts et présentation des modèles de données manipulés

Cette section a pour objectif de présenter le modèle de données sélectionné. La modélisation des données relatives à l'entreprise de transport et au client sont dans un premier temps présentées séparément. Les notions de tournée et planning journalier permettent de faire le lien entre ces deux acteurs dans un deuxième temps.

3.1.1 Modélisation de l'entreprise de transport

Le premier acteur du processus de planification est l'entreprise de transport. La figure 3.1 présente les différentes entités d'une entreprise de transport. Une entreprise peut posséder un ou plusieurs entrepôts selon son activité et sa couverture géographique. L'entrepôt permet d'opérer les différentes activités de transport comme le chargement ou déchargement des marchandises ou le stockage provisoire des marchandises. Il est la base d'entreposage des véhicules utilisés pour opérer les tournées. Chaque entrepôt est caractérisé par un nom et une adresse permettant de l'identifier et de le localiser.

L'entrepôt correspond généralement au lieu de départ et d'arrivée de l'activité de l'entreprise, en l'occurrence des tournées planifiées. Les problèmes multi-entrepôts (Perl et al., 1985 ; Rath et al., 2014) proposent de traiter la planification en utilisant plusieurs lieux de départ. L'objectif est de minimiser le coût en minimisant les temps de transport. Les entrepôts peuvent être limités par leurs capacités de stockage ou de ressources.

Pour réaliser l'ensemble des activités associées à un entrepôt, des ressources sont affectées à un entrepôt. Il s'agit entre autres : des véhicules, des conducteurs, des manutentionnaires, des personnels administratifs et des personnels d'encadrement. Dans la suite, nous allons nous intéresser principalement à deux types de ressources qui sont mobilisés pour réaliser les tournées : les véhicules et les conducteurs (voir 3.1)

Les conducteurs correspondent à un type de ressources de l'entreprise. Ils effectuent un ensemble d'activités, telles que définies par le planning établi par le planificateur. Les activités réalisées comprennent, entre autres, des activités de conduite, des activités administratives (édition des bordereaux de livraison, vérification du chargement, etc.), parfois des activités de chargement/déchargement des véhicules, des activités de manutention. Le périmètre des activités d'un conducteur peut être différent selon l'entreprise ou le type d'entreprise (transport dernier kilomètre, messagerie, transport

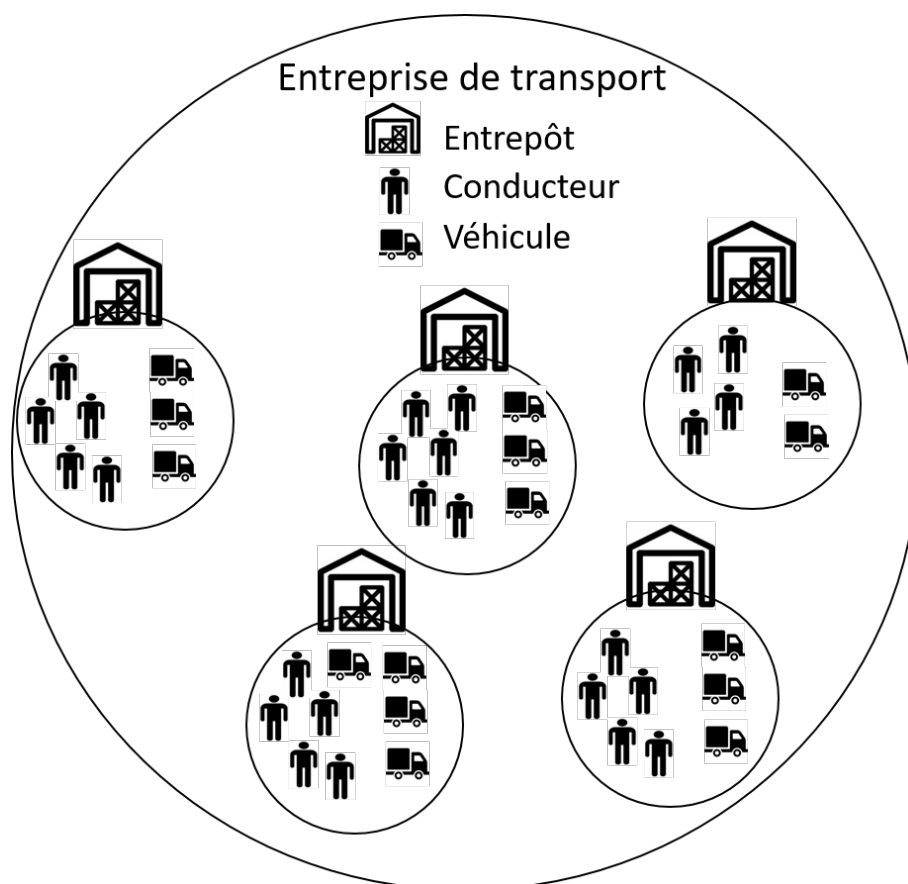


Figure 3.1 – Entités d'une entreprise de transport

international). Dans la littérature, les conducteurs sont modélisés par différents attributs correspondant par exemple à leurs compétences, leur contrat ou à leurs disponibilités (Laurent et al., 2007 ; Li et al., 2010).

Notre objectif est de modéliser le conducteur de la manière la plus globale possible pour prendre en compte le plus de critères. Ainsi, chaque conducteur est décrit par son identifiant qui le rend unique. Cette unicité est d'autant plus importante que chaque conducteur peut avoir des spécificités qui influencent le processus de planification des tournées. Il s'agit par exemple :

- du permis de conduite : permis B seul, permis B et C, etc. ;
- du nombre d'heures par mois prévues dans le contrat de travail avec l'entreprise : 80 heures par mois, 156 heures par mois ;
- de l'expérience acquise : par exemple, l'ancienneté comme conducteur et/ou la connaissance de certains sites ;
- la disponibilité comme les périodes de travail (matin, nuit, etc.) ;
- des restrictions particulières comme par exemple : port de charges supérieures à 10 kg interdit.

Les véhicules correspondent à une autre ressource de l'entreprise. Les véhicules permettent de transporter les marchandises pour les livrer. Dans la littérature, les

véhicules sont modélisés par une liste d'attributs permettant de les décrire et de vérifier si certaines contraintes sont respectées lors de l'élaboration du planning. Parmi les contraintes vérifiées, il y a la capacité du véhicule (Golden et al., 2008 ; Toth et al., 2002), l'utilisation de flottes de véhicules hétérogènes (Duhamel et al., 2012).

L'apport de cette thèse n'étant pas sur les contraintes liées au véhicule, notre objectif est donc d'inclure des attributs représentatifs des différents problèmes possibles. Car c'est à partir de ces attributs que les contraintes sont modélisées. Un véhicule sera décrit à l'aide d'un identifiant pour l'unicité de chaque véhicule, sa plaque d'immatriculation et des caractéristiques techniques complémentaires comme sa hauteur, sa largeur, sa longueur. Les notions comme la quantité de palettes qu'il peut transporter, son volume utilisable ou encore sa charge utile permettent de définir les caractéristiques de livraison du véhicule. Pour prendre en compte les travaux sur les types d'énergie, des attributs comme le type de véhicule, l'énergie du véhicule, la consommation de CO_2 , l'autonomie du véhicule... viennent compléter la liste.

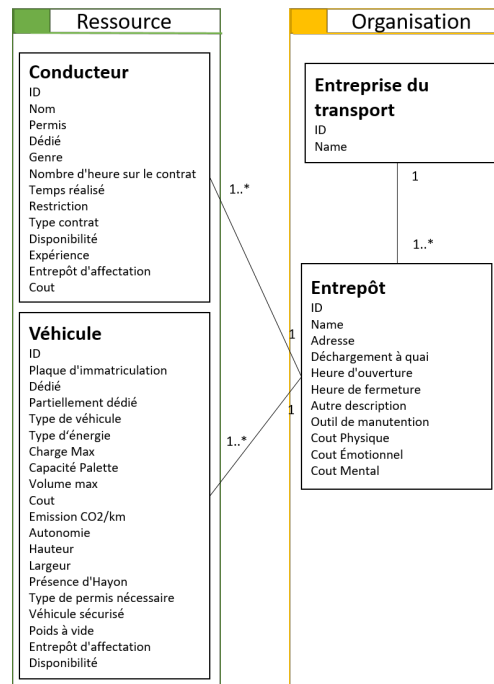


Figure 3.2 – Modélisation des données d'une entreprise de transport routier, diagramme de classe UML

La figure 3.2 propose une vision détaillée des concepts relatifs à la modélisation d'une entreprise de transport qui ont été présentés ci-dessus.

Pour organiser les différents concepts présentés, nous utiliserons la notion de package. Un package a pour objectif de regrouper des concepts similaires pour une meilleure compréhension des données manipulées. Cette notion de package correspond à la structuration des concepts qui sont implémentés dans la plate-forme logicielle

RIOSUITE¹ qui est développée au sein du laboratoire et sur laquelle nous avons implémenté cette modélisation. L'entreprise de transport et l'entrepôt sont dans le package de l'organisation permettant de décrire la structure de l'entreprise. Les concepts véhicule et conducteur sont situés dans le package ressources car ce sont les ressources que l'entreprise va utiliser pour réaliser son activité. Cette représentation crée des liens entre les différents concepts.

Le lien entre l'entreprise de transport et l'entrepôt signifie que l'entreprise de transport possède entre un et plusieurs entrepôts (cardinalité 1..*) tandis qu'un entrepôt appartient à une seule entreprise de transport (cardinalité 1). Le lien entre entrepôt et conducteur signifie qu'un entrepôt possède entre 1 et plusieurs conducteurs tandis qu'un conducteur est rattaché à un seul entrepôt. Pour le dernier lien, l'entrepôt possède un ou plusieurs véhicules et un véhicule est affecté à un seul entrepôt.

3.1.2 La modélisation du client

L'entreprise de transport n'est pas le seul acteur de cette planification. Le client correspond à l'entreprise qui passe le contrat avec l'entreprise de transport. Il s'agit bien ici de l'entreprise qui commande le service de livraison, la livraison pouvant être effectuée entre deux sites de ce client ou de/vers un site autre.

La figure 3.3 décrit la structure d'un client dans le domaine du transport routier de marchandises. Un client peut posséder plusieurs sites, répartis géographiquement, sur lesquels il réalise son activité d'entreprise. Pour effectuer son activité, chaque site a besoin d'être approvisionné en marchandises. Chaque site passe donc des commandes de marchandises qui lui sont propres.

Il est nécessaire de modéliser les informations relatives à chaque client : son nom, sa localisation, ses exigences. Les exigences associées à un client, qui devront être prises en compte lors de la construction des tournées, peuvent porter par exemple sur :

- l'obligation d'utiliser des véhicules sécurisés pour accéder à ses sites ;
- l'obligation d'utiliser d'un type d'énergie particulier, par exemple utilisation de véhicules exclusivement électriques ;
- le refus de mutualiser un véhicule, seules des marchandises le concernant pourront être transportées dans ce véhicule ;
- l'obligation d'utiliser un véhicule appartenant à une liste pré identifiée, notamment pour des raisons de sécurité car seuls ces véhicules sont habilités pour entrer sur ses sites.

Dans la littérature, les notions de client et de site sont souvent confondues (Derigs et al., 2014; Gupta et al., 2012) car chaque site est considéré comme un client indépendant. Notre proposition est de distinguer ces deux notions afin de pouvoir identifier clairement les différents sites d'un même client et de pouvoir leur associer des exigences particulières. Le client est pour nous le propriétaire de plusieurs sites. Cela permet par exemple de préciser pour chaque site des caractéristiques qui leur sont

1. RIOSUITE est accessible en ligne à l'adresse <https://research-gi.mines-albi.fr/display/RIOSUITE/Welcome>

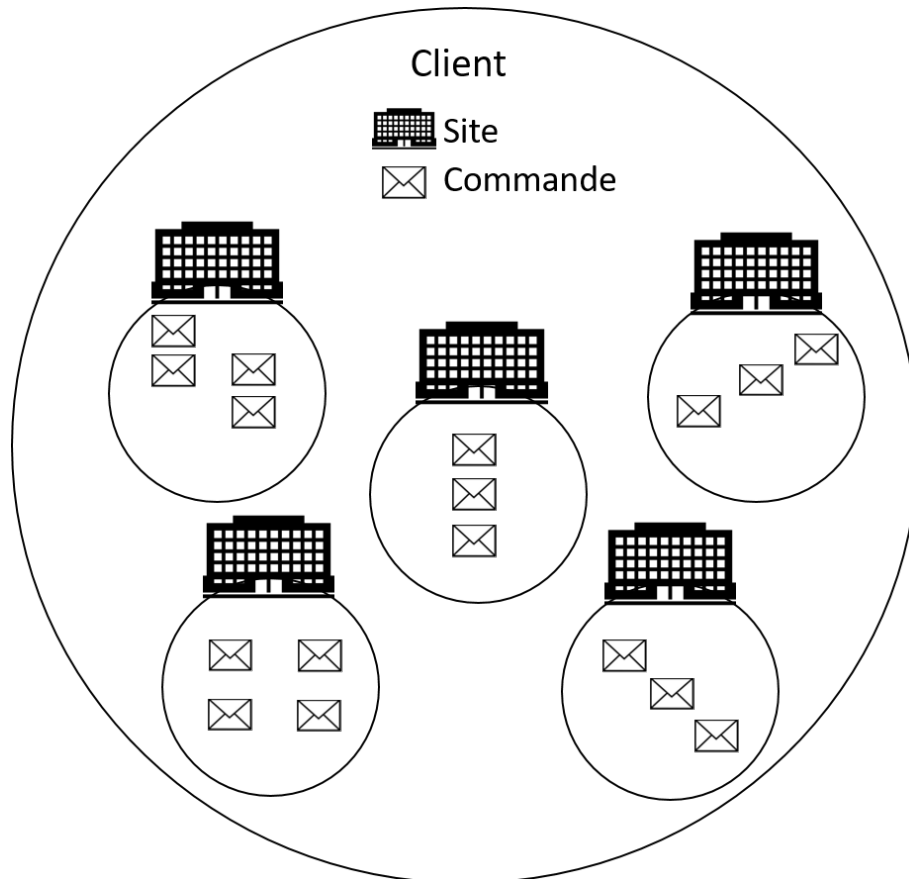


Figure 3.3 – Structure d’un client

propres. Les sites correspondent aux emplacements où doit être livré la marchandise d’un point de vue géographique (Eksioglu et al., 2009). Les sites sont caractérisés par la description des installations permettant d’accueillir le véhicule et les livraisons :

- existence ou non d’un quai de livraison ;
- existence ou non d’un sas pour le dépôt des marchandises et capacité de ce sas (en nombre de palettes par exemple) ;
- le type d’autorisation nécessaire pour l’accès au site (conducteur, véhicule) ;
- accessibilité au site avec une hauteur maximale de véhicules ;
- les horaires d’ouverture du site et/ou les heures de réception des livraisons.

Une structure de données similaire à celle décrivant l’entreprise de transport a été retenue.

Pour être approvisionné en marchandises, un site passe une commande. La commande est la description des marchandises qui doivent être livrées d’un site A à un site B pour un client donné. Dans la littérature, la commande est associée à une demande, cette demande représente la quantité de marchandises à charger ou décharger sur un site (Bianchessi et al., 2007 ; Lee et al., 2012). Notre objectif est de prendre en compte les attributs les plus représentatifs de la description d’une commande. Notre proposition se positionne sur les problèmes de recherche où le respect de l’heure de

livraison est un critère de planification. L'attribut de l'heure de livraison ou de plage horaire est fondamental pour la suite du manuscrit.

Pour nous, la commande est caractérisée par :

- sa nature : la quantité de palettes ou de colis, le volume et la surface des marchandises ;
- les mouvements attendus : l'entrepôt responsable de la livraison (lieu où la marchandise devra être prélevée), le site de livraison (lieu où la marchandise devra être livrée) ;
- l'heure ou la plage horaire à laquelle la commande devra être livrée sur le site destinataire.

D'un point de vue de l'entreprise de transport, la commande est un objectif que l'entreprise doit réaliser. La description du site et du client représentent le contexte dans lequel cet objectif est à réaliser.

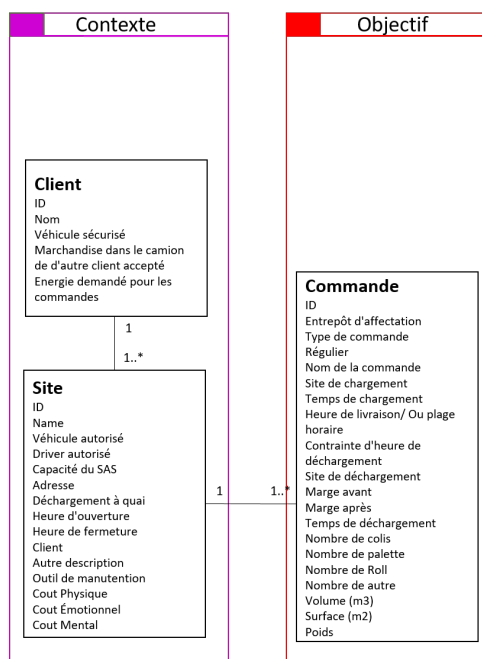


Figure 3.4 – Diagramme de classe du client

Le client peut être modélisé sous la forme d'un diagramme de classe UML (voir figure 3.4). Les concepts client et site sont regroupés dans le package contexte car ils permettent de représenter l'environnement dans lequel l'entreprise de transport effectue son activité. Le package objectif est décrit par le concept commande qui représente finalement ce que l'entreprise doit satisfaire. La représentation permet d'observer qu'un client peut posséder un ou plusieurs sites (cardinalité 1..*) et qu'un site appartient à un seul et unique client (cardinalité 1). Une commande est destinée à un seul et unique site (cardinalité 1) tandis qu'un site peut passer une ou plusieurs commandes (cardinalité 1..*).

3.1.3 Modélisation des tournées et plannings journaliers

Après avoir présenté et modélisé l'environnement de la planification, nous allons nous intéresser à la modélisation des tournées et plannings journaliers. Ce sont ces deux concepts qui permettent de représenter l'activité menée par l'entreprise de transport pour satisfaire les différentes demandes de livraison des clients.

Le résultat de la phase de planification dans le transport routier de marchandises et plus précisément dans la livraison dernier kilomètre est appelé un planning journalier. Le planning journalier, noté PJ , représente la vision macroscopique de l'activité d'une entreprise de transport sur une journée. Il modélise l'ensemble des activités réalisées sur une journée par les ressources affectées à un entrepôt d'une entreprise de transport. Il représente les commandes émises par les différents sites des différents clients. Un planning journalier est évalué sur un certain nombre d'indicateurs comme le coût de réalisation, la durée totale d'exécution, l'émission de CO_2 ...

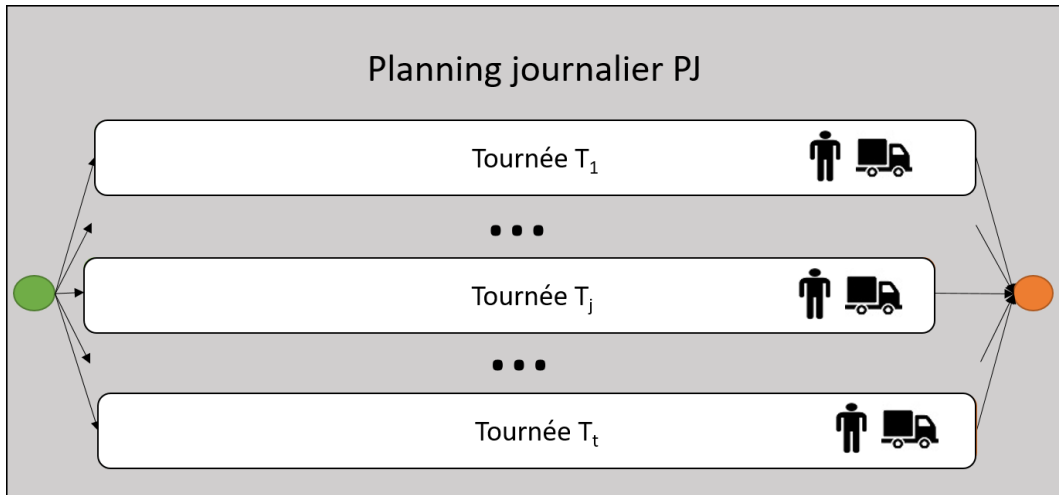


Figure 3.5 – Illustration d'un planning journalier

Un planning journalier PJ , comme représenté figure 3.5, est composé d'un ensemble de tournées, notées $T_j (j = 1, \dots, t)$ avec t le nombre de tournées présentes dans le planning journalier.



Figure 3.6 – Illustration d'une tournée

La notion de tournée correspond à l'ensemble des activités réalisées par un couple conducteur-véhicule sur une plage de temps donnée (par exemple journée, matinée). La tournée a pour objectif la livraison d'un ensemble de commandes sur les sites auxquels elles sont destinées. Une tournée est représentée sous la forme d'un processus noté T . Ce processus correspond à un enchaînement d'activités $A_i (i = 1 \dots a)$

ordonnées, a étant le nombre d'activités nécessaires pour réaliser la tournée. Un exemple de tournée est illustré figure 3.6.

La littérature propose de nombreux modèles pour représenter une tournée. La majorité de ces modèles intègre les activités de chargement/déchargement de la marchandise sur les différents sites et les activités de déplacement d'un site à un autre. Ces deux activités correspondent au travail réalisé par les conducteurs. Cependant, lors d'une journée de travail, le conducteur a des périodes où il ne réalise aucune de ces deux activités. Par exemple, il peut se trouver dans une phase d'attente du réceptionniste sur un site. Notre proposition est de prendre en compte et de modéliser dans notre modèle les périodes où le conducteur attend pour représenter la globalité de sa journée de travail. Nous présentons, ci-dessous, les caractéristiques que nous avons retenues pour modéliser ces deux familles d'activité.

Pour les activités de chargement et de déchargement, des auteurs (Feillet et al., 2002 ; Güner et al., 2017 ; Lera-Romero et al., 2019) utilisent le terme temps de service. Le temps de service est pour ces auteurs le temps nécessaire pour livrer ou récupérer les marchandises sur un site.

Notre proposition est de décomposer ce temps de service en trois types d'activités. Le premier type d'activité nommé « Activity on Site », désigné par « AoS », correspond à l'ensemble des activités réalisées par le conducteur sur le site en cours de livraison. Cette activité inclut le déchargement des marchandises et une partie administrative (comme par exemple la signature des bons de livraison). Le conducteur a également la possibilité de récupérer des marchandises sur le site si la consigne lui en est donnée. Ces marchandises peuvent être à destination de la déchetterie, par exemple pour des encombrants, ou simplement à destination de l'entrepôt quant il s'agit des palettes (retour à vide) pour un stockage temporaire.

Le deuxième type d'activité nommé « Start Activity », désigné par « Start », correspond aux différentes étapes réalisées dans l'entrepôt avant le départ de la tournée. Les démarches regroupées au sein de cette activité comportent la prise de poste de l'agent, une partie administrative (comme la préparation des bons de livraison), le chargement du véhicule. La période de passage des consignes données par le planificateur est également incluse dans cette activité. La première activité d'une tournée est de type Start Activity car l'activité représentera la préparation du véhicule avant d'effectuer la tournée.

Le troisième type d'activité nommé « End Activity », désigné par « End », est similaire à « Start Activity ». Elle correspond aux différentes étapes réalisées dans l'entrepôt à la fin de la tournée, au retour des livraisons. Les démarches au sein de cette activité regroupent le déchargement du véhicule, son nettoyage, une partie administrative ainsi qu'un "feedback" vers le planificateur. Cette discussion permet au conducteur de faire un retour sur le déroulement de sa tournée mais également de présenter les différents problèmes qu'il a pu rencontrer au cours de celle-ci (par exemple : embouteillage, problème technique du véhicule, mauvaise relation avec le client...). La dernière activité d'une tournée est de type End Activity.

Ces trois types d'activités (Activity on site, Start Activity et End Activity) sont caractérisés par une durée d'exécution permettant de connaître le temps nécessaire

pour réaliser l'activité, une localisation pour savoir où se situe l'action à réaliser, une heure de début et une heure de fin dans l'objectif de connaître la période de la journée où est réalisée l'activité.

Pour les activités de déplacement, dans la littérature les auteurs modélisent ces activités à partir d'une matrice des distances et une matrice des temps de trajet (Ai et al., 2009 ; Ruiz et al., 2019). La valeur de la matrice $d_{i,j}$ correspond à la distance ou à la durée nécessaire pour effectuer le trajet entre le site i et le site j . Les activités de déplacement d'un site à un autre sont de type « Move ». Les caractéristiques décrivant cette activité sont la durée de l'activité, l'heure de début et de fin de l'activité, la distance à parcourir et l'émission de CO_2 . La distance de l'activité est extraite de la matrice des distances. Les sites de départ et d'arrivée sont connus à l'aide des activités avant et après l'activité de déplacement. La durée d'activité est calculée à partir de la distance et de la vitesse moyenne. L'émission de CO_2 est calculée à partir de la distance parcourue et de l'émission de CO_2 par kilomètre du véhicule effectuant l'activité.

La commande possède un attribut décrivant l'heure de livraison souhaitée, elle peut être soit à une heure précise soit dans une plage horaire. La littérature permet d'observer que cette contrainte d'heure peut générer des temps d'attente entre la réalisation de deux activités successives (Fabri et al., 2006 ; Haghani et al., 2005). Ce temps d'attente est très peu modélisé, mais il est possible de s'intéresser au temps d'attente comme le font Shyu et al. (2004). Ils prennent en compte le temps disponible et le temps total d'utilisation pour connaître ce temps d'attente. A partir de ces données, ils cherchent à minimiser cette fonction objective.

Dans notre proposition, le type d'activité « Wait » représentera les activités d'attente. Les attributs de l'activité de type Wait sont l'heure de début et l'heure de fin ainsi que la durée de l'activité. Une activité de type Wait est créée si l'heure de fin d'une activité est différente de l'heure de début de l'activité suivante. La durée de l'activité Wait sera égale à la différence entre l'heure de fin d'une activité qui précède l'activité Wait et l'heure de début de l'activité suivante.

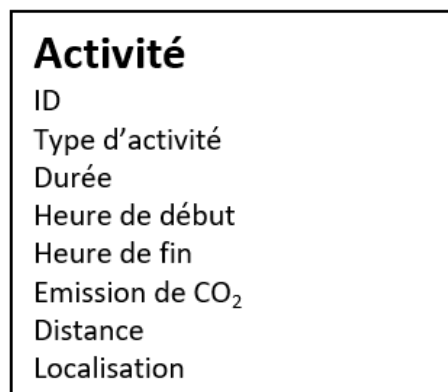


Figure 3.7 – Modèle de données de l'activité

Le modèle de données d'une activité est illustré figure 3.7. Une activité est définie par son type, pris parmi les cinq types d'activité présentés précédemment (Start

activity, Activity on site, Move, Wait et End activity). L'activité est caractérisée par une heure de début et une heure de fin, une durée, une localisation, une émission de CO_2 et une distance parcourue. Les activités de type Start activity, Activity on site, Wait et End activity sont des activités dites statiques pour leur localisation tandis que les activités de type Move sont considérées comme dynamiques.

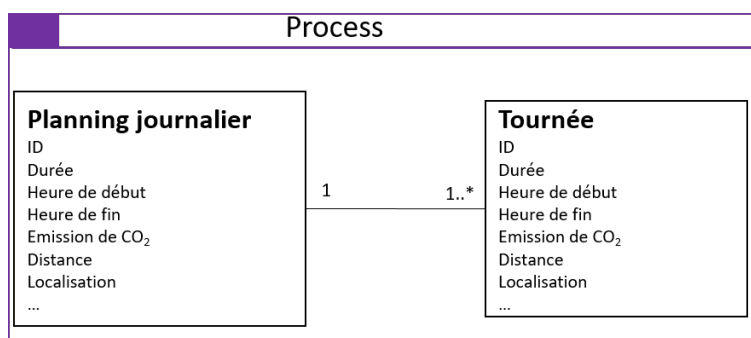


Figure 3.8 – Diagramme de classe des données relatives aux concepts tournée et planning journalier

En s'appuyant sur le modèle de données de l'activité, présenté figure 3.7, la figure 3.8 décrit la modélisation des concepts de planning journalier et de tournée.

Le lien entre le concept planning journalier et celui de tournée indique qu'une tournée appartient à un seul et unique planning journalier tandis qu'un planning journalier est composé d'une ou plusieurs tournées. Les attributs décrivant le planning journalier et la tournée reprennent ceux utilisés pour décrire l'activité. Toutefois, des attributs complémentaires viennent compléter la caractérisation des concepts planning journalier et tournée. Ces attributs sont désignés sous le vocable d'attributs agrégés, car ils sont issus de fonctions de calcul sur la base d'attributs des entités composant la tournée ou le planning journalier. Il s'agit par exemple du temps de conduite associé à une tournée qui correspond à la somme des durées des activités de type Move. La présentation d'un système pour calculer ces attributs est proposée à la fin de ce chapitre.

3.1.4 Synthèse du modèle de données

Le début du chapitre s'est efforcé de présenter les données nécessaires pour effectuer la planification des livraisons. Pour cela, les concepts d'entreprise de transport, de client, de tournée et de planning journalier ont été développés. La suite de cette partie montre les liens entre les différents concepts manipulés.

Les concepts de tournée et de planning journalier établissent le lien entre l'entreprise de transport et le client. La figure 3.9 illustre ce lien. Le planning journalier représente l'activité de l'entreprise sur un entrepôt. Le planning journalier est décomposé en tournées. Une tournée est réalisée par un conducteur et un véhicule pour répondre aux besoins exprimés par le client sous forme de commande. Chaque commande est associée à un site de livraison particulier. Un site appartient à un client.

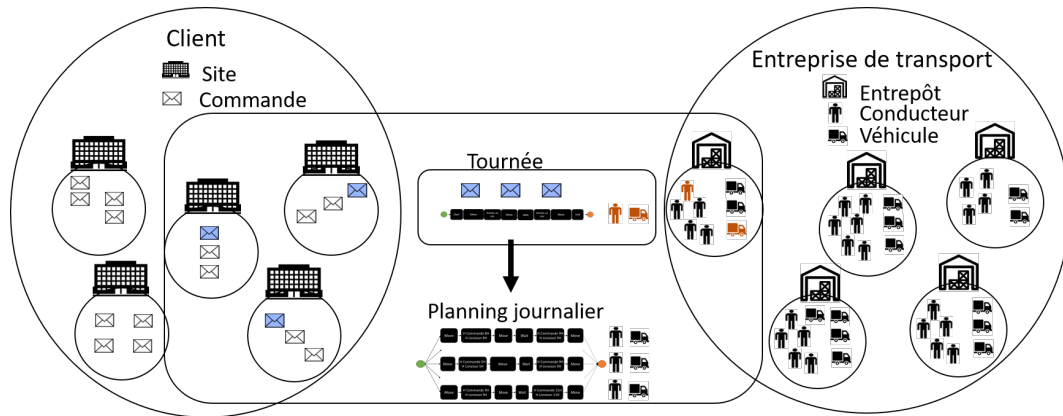


Figure 3.9 – Représentation du lien entre l’entreprise de transport et le client

La figure 3.10 est le modèle de données au format UML de l’ensemble des concepts. Ce modèle de données est composé d’une part du modèle de données de l’entreprise de transport qui possède des entrepôts. Sur chaque entrepôt, des ressources conducteur et véhicule lui sont associées. Pour compléter le modèle de l’entreprise de transport, le modèle de données du client est présent. Le client et ses sites représentent le contexte dans lequel l’entreprise de transport doit réaliser son activité. Les commandes sont l’objectif que l’entreprise de transport va satisfaire avec les différents processus.

Les liens entre la tournée et les ressources représentent le fait qu’une tournée est réalisée par un seul couple conducteur véhicule. Un conducteur peut réaliser plusieurs tournées et le véhicule peut réaliser plusieurs tournées. Pour le lien entre la tournée et la commande, une commande est réalisée par une seule et unique tournée. Mais une tournée peut satisfaire plusieurs commandes en même temps.

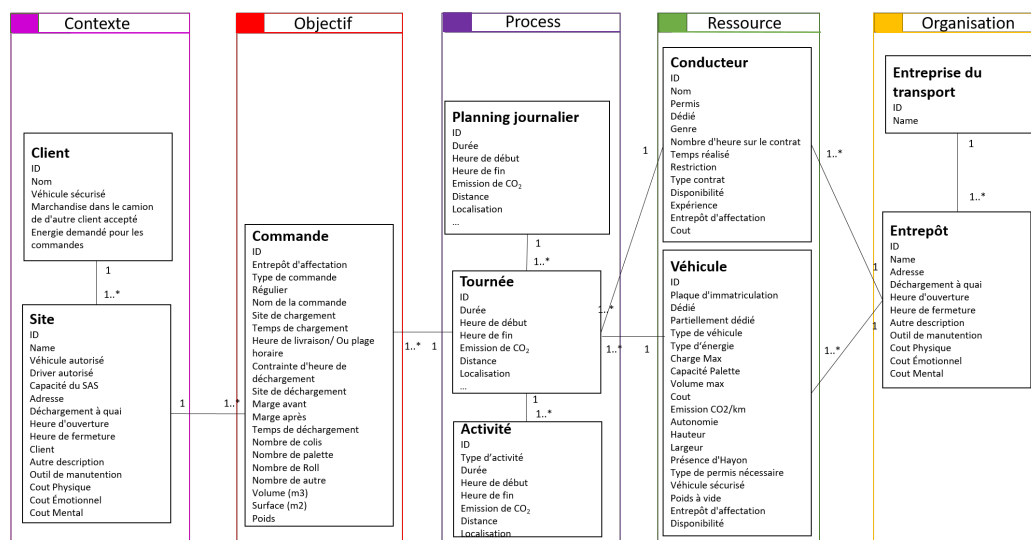


Figure 3.10 – Modèle de données utilisé au format UML

3.2 Évaluation des tournées et du planning journalier

Cette section a pour objectif de présenter le mécanisme permettant de calculer des indicateurs sur les différents tournées et plannings manipulés à partir du modèle de données utilisé. La dernière section est une illustration de ce mécanisme. Ce mécanisme d'évaluation permettra de poser les bases des propositions d'indicateurs du chapitre 5.

3.2.1 Évaluation des tournées : mécanisme de calcul des indicateurs

Dans ce chapitre nous avons vu qu'un planning journalier est composé d'un ensemble de tournées. Une tournée est un enchaînement d'activités. Le modèle de l'activité présente une activité avec des attributs comme la durée, la localisation, l'heure de début, l'heure de fin, le type d'activité, l'émission de CO_2 et la distance parcourue.

Dans la première partie de ce chapitre, les attributs décrivant une tournée sont similaires à ceux décrivant une activité. Cependant, d'autres attributs peuvent être identifiés et calculés à partir des attributs de chaque activité. Il s'agit par exemple d'un attribut lié au type d'activité comme par exemple le temps total des activités de type Move.

Pour les attributs identiques aux attributs de l'activité comme pour les nouveaux attributs de la tournée, ils peuvent être déduits d'un système d'agrégation. La figure 3.11 est la représentation de ce système d'agrégation. Les activités A_i sont décrites par des attributs (Va_1, \dots, Va_x) avec x le nombre d'attributs des activités. En utilisant une fonction spécifique à chaque attribut, les attributs (Va_1, \dots, Va_y) avec y le nombre d'attributs) de la tournée sont calculés à partir des attributs de l'activité ainsi que des attributs des ressources utilisées (D_j le conducteur de la tournée j et V_j le véhicule de la tournée j). Pour différencier les attributs des activités des attributs d'une tournée lors des équations, un attribut d'activité sera $Va_x(A_i)$ et un attribut de tournée sera $Va_y(T_j)$.

L'équation 3.1 permet de définir les différents attributs d'une tournée. L'attribut $Va_h(T_j)$ correspond à l'attribut h de la tournée j avec $h \in (1..y)$. Cet attribut se calcule à partir des attributs $Va_k(A_i)$ de l'ensemble des activités de la tournée avec $k \in (1..x)$ et $i \in (1..a)$.

$$Va_h(T_j) = f(Va_k(A_i), D_j, V_j) \quad (3.1)$$

Maintenant que nous avons expliqué le passage des attributs d'une activité aux attributs agrégés de la tournée, nous allons nous intéresser aux indicateurs. Les indicateurs sont les valeurs pertinentes que souhaite observer rapidement le planificateur pour comparer et sélectionner un planning. A partir des attributs agrégés, il est possible de présenter au planificateur des indicateurs représentatifs de la tournée. Sur

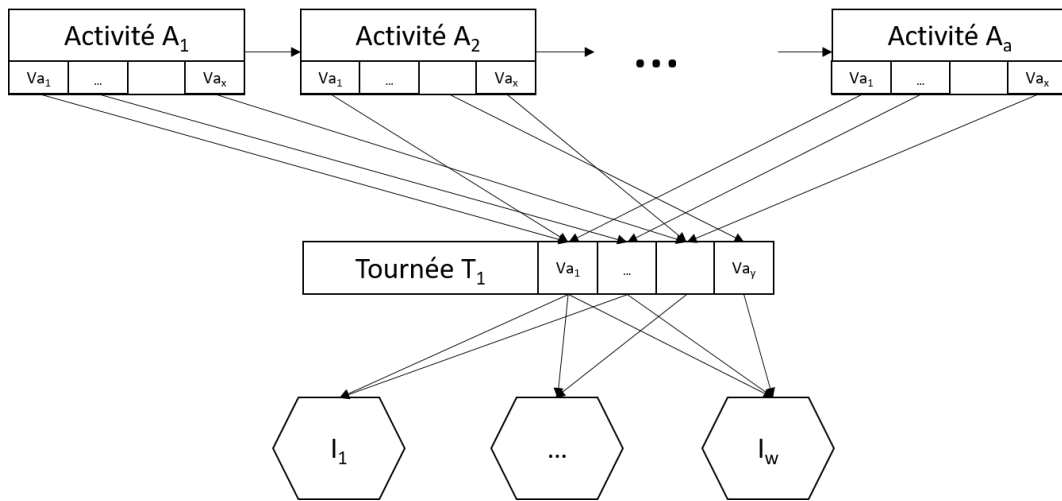


Figure 3.11 – Agrégation des valeurs des activités jusqu’à la tournée

le schéma 3.11, les indicateurs sont notés I_g avec $g \in (1..w)$. Ces indicateurs peuvent regrouper des catégories d’indicateurs pour donner la vision la plus représentative et non répétitive de l’évaluation d’une tournée.

L’équation 3.2 correspond à la formule permettant de calculer les indicateurs en fonction du choix que l’on souhaite représenter. $I_g(T_j)$ est l’indicateur g de la tournée T_j . Chaque indicateur est un choix personnel du planificateur correspondant à une valeur qu’il souhaite mesurer.

$$I_g(T_j) = f(Va_h(T_j)) \quad (3.2)$$

Cette section a permis de montrer comment sont calculés les attributs agrégés des tournées ainsi que des indicateurs représentatifs de la tournée. La section suivante va présenter l’évaluation d’un planning journalier à partir de l’évaluation des tournées.

3.2.2 Évaluation des plannings journaliers

Un planning journalier est composé d’un ensemble de tournées. De manière similaire à la section précédente, nous proposons le passage des attributs des tournées aux attributs d’un planning journalier puis l’évaluation d’indicateurs représentatifs du planning journalier.

Le schéma 3.12 illustre les t tournées du planning PJ_1 . Les tournées sont décrites par les attributs $Va_1...Va_y$. Par une agrégation, il est possible d’obtenir l’ensemble des attributs d’un planning. Ces attributs $Va_1...Va_z$ qualifient la tournée. L’équation 3.3 permet de définir l’attribut f du planning q en utilisant une fonction qui dépend de l’ensemble des attributs des tournées appartenant à ce planning.

$$Va_f(PJ_q) = f(Va_h(T_{j=1..t})) \quad (3.3)$$

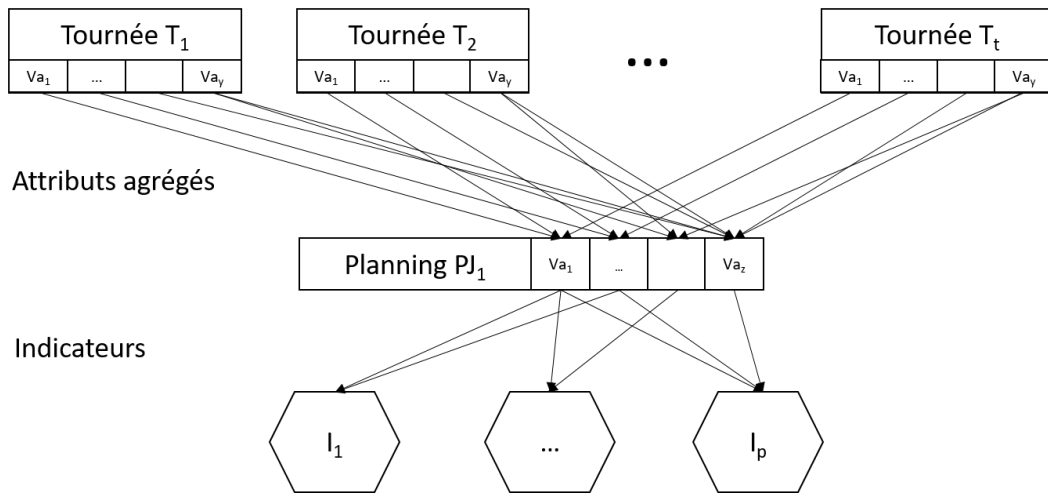


Figure 3.12 – Agrégation des valeurs des tournées jusqu’au planning journalier

De manière similaire à la section précédente, il est possible d’obtenir des indicateurs représentatifs du planning journalier. Les indicateurs sont notés $I_1 \dots I_p$. Ils sont également choisis par le planificateur pour qu’il puisse évaluer les informations qui lui semblent nécessaires.

3.2.3 Illustration des attributs et des indicateurs

Cette section a pour objectif d’illustrer un attribut au niveau d’une tournée, un attribut au niveau d’un planning et de montrer notre positionnement sur les indicateurs. Le choix des indicateurs permet d’illustrer notre cas d’étude.

Au niveau d’une tournée, le planificateur peut s’intéresser au temps de conduite que réalise un conducteur. Pour calculer le temps de conduite dans la tournée, la fonction utilisée est une addition du temps des activités de type Move (équation 3.4). L’attribut « Temps de conduite » de la tournée T_j correspond à la somme des durées si et seulement si le type de l’activité $Type(A_i)$ est de type « Move ».

$$\text{Temps de conduite}(T_j) = \sum_{i=1}^a \text{durée}(A_i) * \begin{cases} 1, & \text{si } Type(A_i) = Move \\ 0, & \text{Sinon} \end{cases} \quad (3.4)$$

Au niveau du planning journalier, le planificateur peut s’intéresser au coût des véhicules généré par les véhicules affectés à son planning. Considérant que le nombre de kilomètres est un attribut de la tournée $km(T_j)$, l’attribut au niveau planning se calcule à l’aide de l’équation 3.5. Le nombre de kilomètres $km(T_j)$ est multiplié par le coût kilométrique du véhicule qui réalise la tournée T_j . La somme de chaque tournée permet d’obtenir le coût de l’utilisation des véhicules sur le planning PJ_1 .

Ce système d'agrégation montre que de nombreux attributs peuvent être créés et doit être adaptés en fonction des attentes du planificateur.

$$\text{Coût des véhicules}(PJ_1) = \sum_{j=1}^t km(T_j) * \text{Coût kilométrique}(V_j) \quad (3.5)$$

Pour les indicateurs, le choix effectué dans le projet ANR SMART PLANNING a été d'utiliser les mêmes noms d'indicateur aux niveaux tournée et planning journalier. Les trois indicateurs sont :

- Environnement (Env.);
- Économique (Fin.);
- Santé sécurité au travail (SST).

Ces trois indicateurs ont été retenus car le projet dans lequel s'inscrit cette thèse se focalise sur la notion de développement durable. Stanitsas et al. (2019) font une revue de la littérature sur le développement durable et présentent ces trois indicateurs comme primordiaux pour ce concept.

Les fonctions d'agrégation de ces trois indicateurs peuvent être différentes au niveau d'une tournée et d'un planning. Cela dépend des choix du planificateur et des données présentes dans l'entreprise pour appliquer les équations associées.

Conclusion

La première partie de ce chapitre présente un modèle de données caractérisant l'entreprise de transport routier. Les éléments principaux qu'il comprend sont l'entreprise elle-même, le client et le planning journalier. Ainsi, ce modèle d'entreprise de transport permet de structurer les différentes ressources présents mais également de prendre en compte les différentes contraintes de planification. La description du client permet de représenter ses exigences à différents niveaux : un niveau global du client ; un niveau plus précis correspondant à chacun de ses sites ; et un niveau encore plus précis correspondant à une commande particulière. Le planning journalier quant à lui est un processus qui répond aux exigences du client tous en respectant les contraintes de l'entreprise de transport.

Ce modèle de données est inspiré de la littérature, mais pour prendre en compte les différents aspects de la réalité à intégrer dans un planning journalier pour le rendre plus réaliste, il est complété par une description précise des types d'activités pouvant être réalisées dans chaque tournée du planning.

La deuxième partie de ce chapitre présente un système d'évaluation d'une tournée puis d'agrégation au niveau d'un planning journalier. Elle montre la personnalisation des attributs que souhaite avoir le planificateur lors de la planification d'une tournée et un planning. Ce système est basé sur la modélisation des activités et de l'ensemble de leurs attributs telle que la durée, l'heure de début, le type d'activité... Cette partie présente également les indicateurs qui permettent de choisir le planning qui sera retenu et exécuté parmi un ensemble de planning respectant aussi les contraintes imposées.

Dans le cadre de ce travail, nous avons fait le choix de conserver trois indicateurs : économique, environnement et santé sécurité au travail. Le système d'agrégation présenté ici sera utilisé dans le chapitre 5 dans le cadre de notre contribution sur la proposition d'indicateurs pour évaluer la robustesse.

Chapitre 4

Génération automatique des risques à partir d'un portefeuille de dangers

Introduction

Dans le contexte de la livraison dernier kilomètre, la planification joue un rôle clé pour le succès de l'entreprise. Cependant cette planification est souvent perturbée par le contexte risqué dans lequel elle se réalise. Les changements d'environnement ou d'hypothèse intervenant lors de la réalisation des tournées, par rapport à ceux formulés lors de la phase de planification, peuvent être de nature à rendre la tournée non satisfaisante vis-à-vis des objectifs fixés (respect d'un créneau horaire de livraison par exemple) voire irréalisable. Il convient donc d'aider le planificateur dès la phase d'élaboration des tournées à prendre en compte les éventuels aléas qui pourraient survenir pendant la réalisation de la mission. Nous parlerons de conception de tournées pilotée par les risques.

A partir du modèle de données présenté dans le chapitre 3, ce chapitre va s'efforcer de répondre à la première question de recherche : « Comment identifier automatiquement les risques associés à un planning journalier et comment évaluer leurs impacts sur le planning ? » Un planificateur doit sélectionner un planning parmi plusieurs plannings. La construction du planning ainsi que la sélection sont effectuées à J-1, la veille de sa réalisation. Les délais pour sélectionner ce planning sont restreints, les commandes peuvent arriver au fil de l'eau toute la journée jusque tard en fin d'après-midi. Le planificateur ne peut pas identifier manuellement l'ensemble des risques sur l'ensemble des plannings et évaluer leurs impacts dans les temps impartis. C'est pourquoi nous proposons un modèle permettant d'effectuer cette tâche automatiquement.

Comme discuté dans le chapitre 2, la plupart des travaux de recherche s'intéressant à la gestion des risques, que ce soit dans les domaines de la gestion de projet comme des risques d'entreprise, s'appuient sur un processus d'identification des risques permettant d'établir une liste des risques à évaluer. Ce processus est généralement effectué de manière manuelle par un expert humain s'appuyant sur son expertise et la connaissance qu'il a du système à analyser (le projet, les processus de l'entreprise, le contexte, etc.). Cette démarche, focalisée sur l'expertise humaine, est totalement

adaptée pour l'identification des risques sur des systèmes à dynamique lente ou relativement lente comme c'est le cas pour des projets de taille importante (plusieurs mois voire années). Le temps admissible pour mener cette identification est relativement important (plusieurs heures voire plusieurs jours).

Dans le cadre de nos travaux, concernant la comparaison de la robustesse de plusieurs plannings journaliers, il convient d'être en capacité de pouvoir identifier dans un laps de temps très court (inférieur à l'heure) les risques de plusieurs dizaines voire centaines de plannings journaliers concurrents.

L'humain seul n'est pas en capacité de mener cette phase sous ces contraintes de délai. Pour l'aider dans cette étape, nous allons introduire le concept de danger permettant de constituer une modélisation des potentialités de dommages ou d'aléas pouvant s'exercer sur un système. Dans nos travaux, nous allons nous intéresser aux dangers pouvant apparaître lors de l'exécution des tournées et pouvant influencer leur déroulé.

Dans ce chapitre, nous allons présenter le concept de danger. La modélisation du concept danger a pour objectif de créer une structure de données capable de stocker les informations relatives à la description d'un danger et permettant d'assister la génération automatique des risques induits. Dans un deuxième temps, nous exposons les principes permettant de générer automatiquement la liste des risques, à partir d'un portefeuille de dangers préalablement modélisés et de la tournée à évaluer.

Ensuite, nous proposons un mécanisme permettant l'évaluation de l'impact de ces risques sur la tournée s'appuyant sur la simulation des scénarios possibles de risques. Enfin et pour finir, ce chapitre sera focalisé sur l'analyse et l'évaluation des scénarios de projet par la proposition d'indicateurs adaptés.

Cette dernière partie permettra de poser les bases de la structure permettant d'évaluer les indicateurs sur les différents scénarios et sera pour nous le lien pour présenter les indicateurs de robustesse (Chapitre 5).

4.1 Définition du concept de danger

4.1.1 Présentation du concept de danger

Selon Desroches (2013), l'existence d'un risque est associée à la rencontre d'un danger et d'un système exposé vulnérable. L'existence d'un danger seul non confronté à un système vulnérable ne conduit pas à l'apparition d'un risque. Un système pouvant être par exemple un être vivant, une installation industrielle ou une maison. Prenons l'exemple d'une falaise qui présente un danger d'effondrement, si cette falaise est localisée dans un espace non accessible (aucune d'habitation, aucun être vivant à proximité, ...) alors aucun risque n'est à considérer.

Sur la base des définitions identifiées dans la revue de littérature (Fertier, 2018) et inspirées des travaux de Desroches (Desroches, 2015), un danger (voir figure 4.1) est considéré comme toute source de dommages potentiels ayant pour conséquence de modifier les caractéristiques d'un élément du système.

Comme présenté dans la figure 4.1, un danger (dz) est décrit par trois attributs :

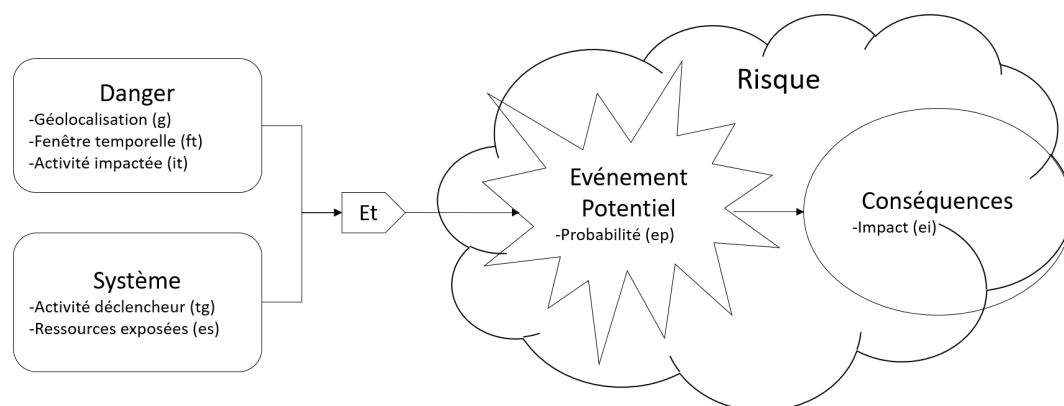


Figure 4.1 – Scénario d'ingénierie des risques inspiré de Desroches (2013) et Desroches (2015)

- la géolocalisation (g) correspondant à l'endroit géographique où se situe le danger ;
- la fenêtre temporelle (ft) correspondant à la période à laquelle le danger est présent ;
- l'activité impactée (it) correspondant au type d'activité pouvant être modifié si le danger se concrétise en risque.

La géolocalisation (g) également appelée zone de danger est définie comme « *tout espace dans et/ou autour de machines dans lequel une personne peut être exposée à un danger* »¹. La représentation mathématique de cette zone géographique est un polygone placé sur une carte.

Une fenêtre temporelle (ft) représente la période où le danger est potentiellement présent et où tout système présent dans la zone de danger pourrait être affecté par un risque. La fenêtre temporelle peut être exprimée par des expressions temporelles avec des jours et des heures. Par exemple, tous les vendredis entre 16h30 et 17h30 peut correspondre à la fenêtre temporelle sur laquelle le danger peut se réaliser.

Une activité impactée (it) correspond à l'activité subissant l'ensemble des impacts lorsqu'un risque se produit sur le processus. Il s'agit ici d'indiquer le type d'activité qui pourra être impacté par ce danger.

Comme présenté dans la figure 4.1, un système st est décrit par deux attributs :

- l'élément déclencheur (tg) correspondant à l'élément du système qui pourra être à l'origine du risque ;
- les ressources exposées (es) correspondant à l'ensemble des ressources du système qui est susceptibles d'être exposé au danger.

L'élément déclencheur (tg) répertorie les facteurs déclencheurs à l'origine de la transformation d'un danger en risque.

Les ressources exposées (es) décrivent des éléments du système, quelque chose ou quelqu'un, pouvant être concerné par les risques induits par ce danger.

1. ISO15442 :2012

Au final, un risque correspond à l'exposition d'un système à un danger. On cherche dans la modélisation du danger à être capable de générer automatiquement la création de risques ainsi que les valeurs des attributs du risque.

La définition du risque comporte deux parties :

- la potentialité de survenue, fréquemment exprimée sous forme d'une probabilité ;
- l'impact de la survenue.

La potentialité de survenue est caractérisée, au niveau du concept de danger, par un estimateur de probabilité ep . L'estimateur de probabilité (ep) est une expression ou une fonction qui définit la valeur de probabilité du risque induit par un danger pour une situation spécifique. Cette expression, évaluée au moment de la génération du risque, est basée sur les éléments du contexte du danger ainsi que les ressources exposées au danger. L'estimateur de probabilité du danger dz se calcule à l'aide d'une fonction prenant en compte la fenêtre temporelle et les ressources exposées (équation 4.1).

Lors de la réalisation de cet événement, des conséquences se produisent. L'impact de survenue est caractérisé par un estimateur d'impact ei . Cet estimateur a pour objectif d'estimer la grandeur des impacts du risque au moment de sa génération en fonction de la fenêtre temporelle et des ressources exposées.

L'estimateur d'impact (ei) est une expression destinée à spécifier le niveau d'impact du risque induit par ce danger pour une situation spécifique. Comme l'estimateur de probabilité, l'estimateur d'impact est basé sur des éléments de contexte. Fertier (2018) indiquent qu'un danger comporte des risques pour chaque enjeu de son périmètre. Plusieurs expressions peuvent être développées en fonction de la diversité des types d'impacts : retard, coût, fatigue, sécurité, émissions de CO_2 ... Chaque impact du danger dz peut être défini par une équation 4.2.

La définition de ces deux estimateurs en fonction du danger et du système est primordiale pour la génération automatique des risques. A chaque fois qu'un système est exposé à un danger, ces estimateurs seront calculés afin d'estimer les dimensions probabilité et impact du risque associé.

$$ep = g_{Probadz}(ft, es) \quad (4.1)$$

$$ei = g_{Impactdz}(ft, es) \quad (4.2)$$

4.1.2 Application au transport routier de marchandises

La proposition de ce modèle de danger générique doit être adaptée à notre modélisation des tournées et planning journalier du transport routier de marchandises. Plusieurs adaptations sont proposées.

Dans le domaine du transport, la zone de danger ou géolocalisation d'un danger correspond à une zone géographique repérée sur une carte par un polygone par exemple. Ainsi, la zone représentant le centre-ville peut être matérialisée par une zone de danger.

Pour modéliser la fenêtre de temps (ft), le choix est de décomposer cette fenêtre de temps en une plage journalière et une plage horaire.

La plage journalière peut comporter différents ensembles comme les jours de la semaine (Lundi, Mardi, ... Dimanche), les jours fériés, une période de temps (ex : du 12 juillet au 15 août). Il faut noter que pour la réalisation d'une tournée d'un jour précis, plusieurs plages journalières peuvent se superposer. Par exemple, le jeudi 15 août est à la fois un jour férié, un jeudi et peut appartenir à une période de temps. La proposition est donc de mettre un ordre de priorité sur l'ensemble des plages journalières pour déterminer le risque à générer.

Pour la plage horaire, l'ensemble des intervalles est décrit selon la même unité temporelle donc il n'y a pas de superposition possible comme pour la plage journalière. Chaque plage horaire permet de définir une partie de la journée.

Un danger est associé à un type d'activité (it). Les différents types d'activités présentés dans le chapitre 3 sont Start Activity, Move, Wait, Activity on Site et End Activity. Un danger est donc associé à un seul de ces cinq types d'activités. Ainsi, un danger dz ne pourra impacter qu'un seul type d'activité, pris parmi les 5 possibles. Ainsi, la survenue du risque associé pourra entraîner des modifications dans les valeurs des attributs de ce type d'activité. Par exemple, une activité de conduite peut être impactée par un danger de bouchon, la durée de l'activité de conduite sera alors impactée et verra sa durée augmenter. Nous verrons ce point plus en détail dans la section 4.2.

L'élément déclencheur, ici l'activité déclencheur (tg) du risque correspond à l'activité concernée par le danger. Dans notre contexte de planification des livraisons dernier kilomètre, il s'agira de considérer le système planning et plus particulièrement les activités de ce planning. Ainsi, une activité de conduite qui passe sur une zone de danger à l'intérieur de la fenêtre temporelle sera un élément (activité) déclencheur pour l'apparition du risque. Nous formulons une première hypothèse considérant que c'est cette même activité qui sera impactée par le risque. Nous sommes conscients que cette hypothèse peut sembler restrictive, toutefois elle nous permet de traiter la plupart des situations réelles. La levée de cette hypothèse fera l'objet de perspectives de nos travaux. Par exemple, le fait d'effectuer une livraison dans une zone de danger peut déclencher un risque de blessure sur cette même activité.

Pour les ressources exposées es , il n'y a pas de particularité dans le transport routier de marchandises. L'utilisation d'un véhicule et du conducteur associé sont des exemples de ressources exposées au risque.

La figure 4.2 est la représentation d'un danger de bouchon sur une carte. Il concerne un échangeur à l'intersection de deux routes importantes. La légende de la figure propose un ensemble d'attributs décrivant ce danger. Un identifiant unique lui est attribué. Les plages journalières sur lesquelles un risque peut être généré sont du

1er Juillet au 31 Août 2019, le 15 Août, ainsi que les lundis, jeudis et vendredis toute l'année. Les plages horaires sont de 7h à 9h et de 18h à 20h. Le type d'activité impacté est le type "Move". Cela veut dire que seules des activités de conduite (de type Move) passant par cette zone pourront être impactées par ce danger et faire l'objet de la génération d'un risque.

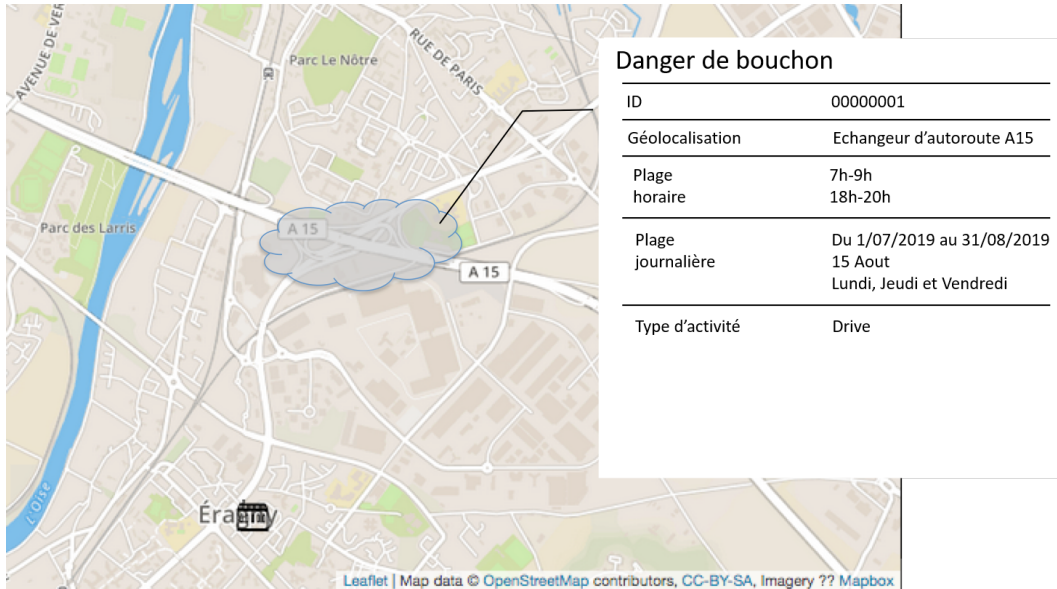


Figure 4.2 – Illustration d'un danger de bouchon

Pour la description du système, l'élément déclencheur, ici l'activité, correspond à une activité de type Move. Pour l'application au transport routier de marchandises, le véhicule utilisé lors de l'activité correspond aux ressources exposées au danger.

A partir du danger décrit et du système, la figure 4.3 illustre un exemple de modélisation d'un risque de bouchon. Un risque peut être généré sur l'activité impactée. L'estimateur de probabilité et l'estimateur d'impact peuvent être calculés à partir de la fenêtre temporelle et des ressources exposées (équation 4.1 et 4.2).

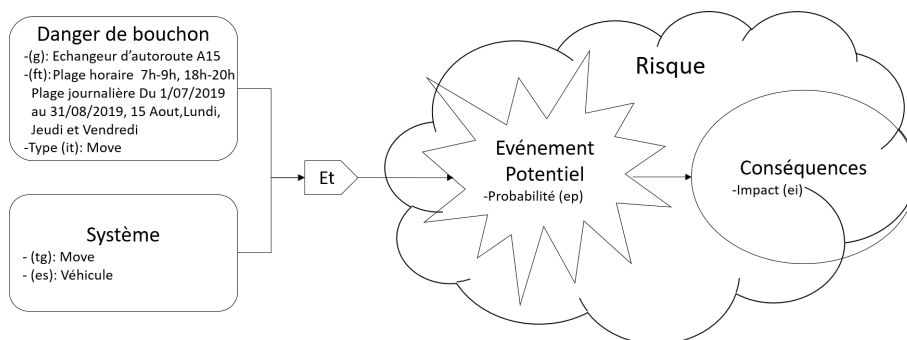


Figure 4.3 – Application d'un scénario d'ingénierie des risques au domaine du transport routier de marchandises

Les valeurs ep et ei dépendent de la fenêtre de temps ft et des ressources exposées es . Notre proposition est de traiter les deux variables ft et es séparément. Pour

la fenêtre de temps, notre choix de représentation est une table représentant les différentes plages journalières ordonnées par ordre de priorité pour les lignes et les colonnes représentent les différentes plages horaires. La table 4.1 est une illustration pour l'estimateur de probabilité. Chaque case remplie est une valeur numérique servant soit pour le calcul de la probabilité ep soit pour le calcul de l'impact ei . Ces valeurs sont estimées par un expert lors de la création du danger. La fonction $f()$ sera soit une fonction associée à la probabilité ($f_{Probadz}(plagejournaliere, plagehoraire)$) soit une fonction associée à l'impact $f_{Impactdz}(plagejournaliere, plagehoraire)$.

Table 4.1 – Représentation des estimateurs pour la partie fenêtre temporelle

Ordre	Plage journalière	Plages horaires		
		Ph1	Ph2	Ph3
1	Pj1	f(Pj1,Ph1)	f(Pj1,Ph2)	f(Pj1,Ph3)
2	Pj2	f(Pj2,Ph1)	f(Pj2,Ph2)	f(Pj2,Ph3)
3	Pj3	f(Pj3,Ph1)	f(Pj3,Ph2)	f(Pj3,Ph3)
4	Pj4	f(Pj4,Ph1)	f(Pj4,Ph2)	f(Pj4,Ph3)
5	Pj5	f(Pj5,Ph1)	f(Pj5,Ph2)	f(Pj5,Ph3)

Les tables 4.2 et 4.3 sont des exemples de fonctions de probabilité et d'impact, exprimées sous forme de tables, appliquées au danger de bouchon. Un premier constat est que les plages journalières se superposent. Le jeudi 15 Août est présent dans les trois plages journalières. L'ordre de préférence est donc nécessaire pour déterminer les valeurs des différentes fonctions. Un risque présent le Jeudi 15 août à 8 heures aurait une probabilité de 25% et un impact de 20 minutes. Un risque présent le lundi 2 septembre à 19 heures aurait une probabilité de 30% et un impact de 15 minutes.

Table 4.2 – Fonction de probabilité (%) $F_{probaA15}$

Ordre		7h-9h	18h-20h
1	1er Juillet 2019 au 31 Août 2019	25	15
2	15 Août	40	30
3	Lundi, Jeudi, Vendredi	30	30

Table 4.3 – Fonction d'impact (minutes) $F_{impactA15}$

Ordre		7h-9h	18h-20h
1	1er Juillet 2019 au 31 Août 2019	20	15
2	15 Août	25	10
3	Lundi, Jeudi, Vendredi	15	15

Pour la partie des ressources exposées, notre proposition finale est de considérer un coefficient associé au type de véhicule ($coefProbV$ et $coefImpV$) permettant de

multiplier la probabilité et l'impact déjà obtenus à l'aide de la fenêtre de temps par cette valeur. Ces coefficients sont déterminés par les experts. Si un expert considère qu'une ressource a une probabilité plus importante que la valeur estimée de base, alors le coefficient sera supérieur à 1. Si la probabilité est inférieure alors le coefficient proposé sera inférieur à 1. Le même raisonnement s'applique pour le coefficient de l'impact.

Les équations utilisées pour calculer les valeurs de ep et ei sont les équations 4.3 et 4.4. Les deux valeurs sont obtenues par une fonction qui dépend de la fenêtre de temps ft multipliée par un coefficient attribué par les experts aux ressources exposées es .

$$pe = f_{Probadz}(plagejournalière, plagehoraire) * coefProbV \quad (4.3)$$

$$ie = f_{Impactdz}(plagejournalière, plagehoraire) * coefImpV \quad (4.4)$$

4.2 Génération des risques

Le concept de danger est à présent décrit. Nous allons donc nous intéresser à un risque généré sur un planning et plus particulièrement sur une tournée car un planning journalier est un ensemble de tournées et chaque tournée est un processus pouvant être traité de manière indépendante.

Un risque est généré lorsqu'un système s'expose à un danger. Dans notre représentation du danger et du système, l'intersection de ces deux concepts se fait par la localisation. C'est-à-dire qu'un risque est généré si l'activité se trouve localisée dans la zone de danger. Dans le chapitre 3, nous avons vu que les activités pouvaient être soit de type statique soit de type dynamique dépendant de la manière dont elles sont réalisées. Les activités de type statique sont menées en un seul lieu (Start Activity, Wait, Activity on Site et End Activity) alors que les activités de type dynamique sont caractérisées par un changement de position géographique (activités "Move"). Dans la section précédente, nous avons mis en place le fait qu'un danger impacte un type d'activité. Donc, pour qu'un risque soit généré, il faut que le type de l'activité déclencheur tg appartenant au système soit du même type que celui impacté par le danger. Si le type d'activité est différent alors aucun risque n'est généré. Par exemple un danger de bouchon impactant les activités « Move » ne peut pas générer un risque de bouchon sur une activité de type « Activity on site » correspondant à du déchargement.

Dans la suite de cette section, nous nous plaçons dans l'hypothèse où le type d'activité impacté par le danger est le même que l'activité déclencheur tg .

Nous allons présenter successivement les mécanismes proposés pour la génération des risques dans le cas des activités de type statique (section 4.2.1) puis des activités de type dynamique (section 4.2.2).

4.2.1 Génération d'un risque pour les activités de type statique

Soit une activité de type statique, deux cas peuvent se présenter (figure 4.4). Dans le premier cas, l'activité réalisée n'est exposée à aucun danger car elle ne se situe dans aucune zone de danger. L'activité ne s'effectuant pas dans la localisation du danger, aucun risque n'est généré sur la tournée.

Dans le second cas, l'activité est menée à l'intérieur d'une zone de danger donc un risque doit être généré sur l'activité. Cette activité est le déclencheur et son type est défini comme impacté par le danger.

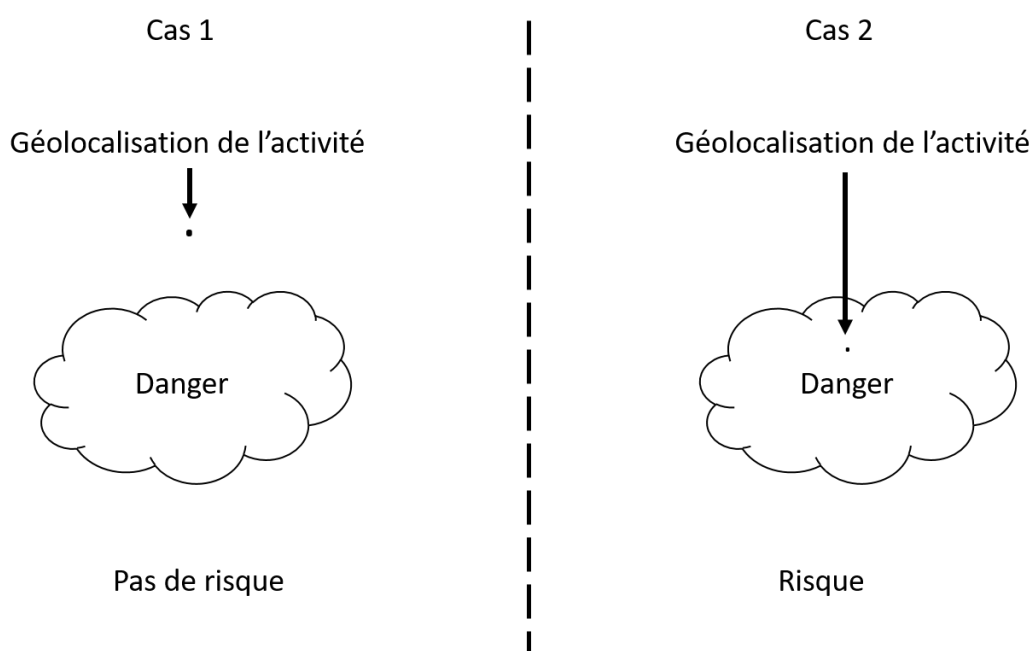


Figure 4.4 – Principe de génération d'un risque pour une activité de type statique

Donc un risque R est généré à partir d'un danger dz sur une activité A du processus (l'activité A est l'activité déclencheur tg) si la localisation de l'activité est présente dans la localisation de la zone de danger g .

4.2.2 Génération d'un risque pour les activités de déplacement

Comme pour les activités de type statique, nous considérons que le type d'activité impacté par un danger est le même que pour l'activité déclencheur (tg) du système sinon aucun risque n'est généré.

Dans cette partie, l'activité est de type dynamique. Quatre situations peuvent être identifiées. La figure 4.5 représente les différentes situations possibles de la

confrontation d'une activité à un danger. Le cas 1 décrit une activité de déplacement qui n'est exposée à aucun danger identifié. Dans ce cas, il n'y a pas de risque à générer. Le cas 2 montre une activité de déplacement se réalisant entièrement dans la zone de danger. Un risque associé à ce danger doit être généré sur cette activité. Pour le cas 3 et le cas 4, l'activité de déplacement se déroule partiellement dans une zone de danger. Dans le cas 3, elle commence ou se termine dans une zone de danger. Dans le cas 4, l'activité traverse une zone de danger. Il a été décidé qu'à partir du moment où une partie de l'activité est exposée à un danger, un risque associé à ce danger est généré sur l'activité. Pour une activité exposée à plusieurs dangers, notre choix est de générer un risque pour chaque zone de danger intersectée par l'activité de déplacement.

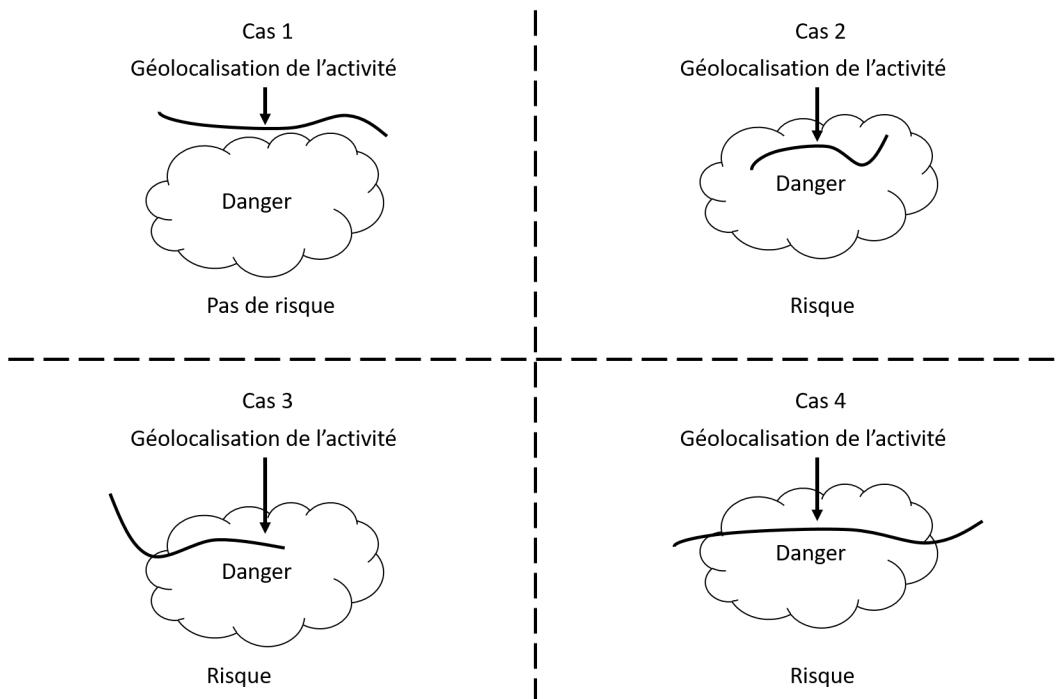


Figure 4.5 – Génération de risque d'une activité de type dynamique

Pour les activités de type statique, un risque est généré si la localisation de l'activité se situe dans la localisation de la zone de danger. Pour une activité de type dynamique, s'il y a une intersection entre la localisation de l'activité de type dynamique et la localisation du danger, alors un risque est généré.

Maintenant que nous avons présenté le mécanisme permettant de générer des risques sur les activités du planning, nous allons structurer la proposition sur le portefeuille de dangers.

4.2.3 Structuration de la proposition

Dans notre étude, deux dangers de même type ne peuvent pas avoir leurs zones de danger qui se superposent. Cela a pour objectif d'éviter les grandes zones de danger et obliger les dangers à être localisés précisément.

Les conséquences de cette hypothèse de travail sont qu'une activité de type statique ne peut être affectée que par un seul et unique risque. Car une activité A de type statique (avec l'activité A activité déclencheur tg) est localisée à un seul et unique lieu et que les zones de danger ne peuvent pas se superposer. Alors si A est dans la zone du danger dz_i , l'activité ne peut pas être dans la zone de danger du danger dz_j . Donc, pour toutes les activités de type statique, un seul risque peut être généré sur l'activité.

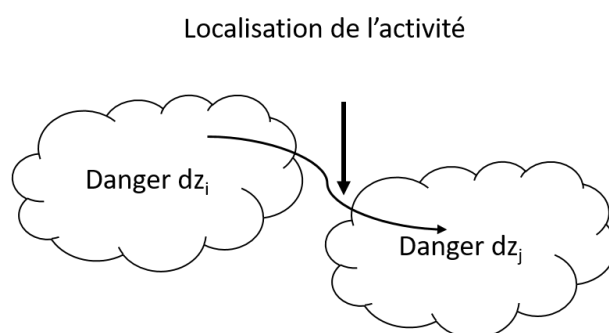


Figure 4.6 – Génération multiple de risque pour une activité dynamique

Cependant pour les activités de type dynamique, comme l'illustre la figure 4.6, les dangers peuvent générer plusieurs risques sur une même activité. Les dangers dz_i et dz_j ont une localisation disjointe mais l'activité est présente dans les deux zones donc deux risques sont générés. Le constat est que l'activité de type dynamique dépend du temps : il est possible de connaître l'ordre d'apparition des risques générés par les différents dangers.

4.3 Génération des scénarios de projet

Maintenant que le processus de génération de risque a été présenté, nous allons nous intéresser aux impacts des risques sur la tournée. La tournée correspond à un processus d'activité comme présenté dans le chapitre 3. Comme chaque activité est localisée, il est possible à partir des dangers modélisés de générer des risques sur chacune des activités. Une fois les risques générés sur les activités de la tournée, différents scénarios de projet peuvent se produire. Selon Marmier et al. (2013), un scénario de risques correspond à une combinaison des risques survenant sur un projet.

L'objectif de cette section est de présenter les différents scénarios de projet possibles à partir du modèle proposé précédemment et de proposer une approche permettant de mieux structurer les scénarios de projet.

4.3.1 La représentation des scénarios de projet

Soit une tournée T ayant a activités $A_i (i = 1...a)$. Lors de la localisation des activités de la tournée T , les dangers listés par les experts conduisent à l'identification automatique (ou génération) d'un nombre r de risques sur les activités de la tournée.

La tournée comportant r risques conduit à 2^r scénarios de projet. Soit le scénario ScP_k , considéré comme une implémentation possible avec s risques ($0 \leq s \leq r$). Le nombre total de scénarios de projet présentant s risques est égal à $r!/s(r-s)!$. Le scénario de projet noté ScP_\emptyset correspond à la situation pour laquelle aucun risque ne survient.

Dans cette proposition, il a été décidé, dans un premier temps, de travailler sur l'évaluation des impacts de type temporel. Nous sommes conscients que ce choix est limitatif. La prise en compte d'autres types d'impacts devra faire l'objet de travaux ultérieurs. Lorsqu'un scénario de risques se concrétise sur une tournée, les modifications induites sur la tournée (modification de durée de certaines activités), on parle de scénario de projet pour représenter cette nouvelle version de la tournée. Marmier et al. (2013) définissent un scénario de projet comme une réalisation possible de projet construite avec un scénario de risques et un scénario de traitement.

L'un des objectifs du planning est de satisfaire le client, il faut donc s'intéresser à l'écart généré par les risques entre le planning simulé par un scénario de risques et le planning initialement planifié correspondant au scénario de risques ScP_\emptyset .

Pour rappel, les activités d'une tournée possèdent comme attributs l'heure de début, une durée et l'heure de fin. De plus, les attributs de probabilité ep et d'impact ei des risques dépendent des fenêtres temporelles donc de l'heure à laquelle s'effectue l'activité. L'impact ei d'un risque est un impact mesuré en temps. L'activité sur laquelle le risque est déclaré peut voir sa durée modifiée s'il survient.

L'ensemble des activités d'une tournée sont réalisées les unes après les autres. Ainsi, l'impact d'un risque sur la première activité de la tournée peut modifier l'heure de début et de fin des activités suivantes. On peut effectuer le même constat sur la deuxième activité de la tournée vers ses activités successeurs. Le calcul des valeurs de probabilité et d'impact des risques doit se faire par ordre d'apparition des risques sur la tournée observée. L'exemple présent à la fin de ce chapitre permettra d'illustrer que la probabilité et l'impact d'un risque sont dépendants des risques présents sur les activités précédentes d'une tournée.

Soit r risques présents sur une tournée, classés de R_1 à R_r où R_1 est le premier risque apparaissant sur le processus de manière chronologique et R_r le dernier. Pour connaître l'impact du risque R_j $j \in 1..r$ sur une activité, il faut appliquer l'impact de l'ensemble des risques R_i avec $i < j$ présents dans le scénario de projet observé. Puis, une fois arrivé au risque R_j , il est possible d'estimer l'impact de ce risque en utilisant la valeur d'impact ei à laquelle est associée une fonction dépendant de la fenêtre temporelle ft et des ressources exposées es . De manière similaire, pour connaître la probabilité ep du risque R_j dans un scénario de risques, il faut effectuer le même mécanisme que pour l'impact. Il faut traiter l'ensemble des risques R_i avec $i < j$ présents dans le scénario puis appliquer la fonction permettant d'obtenir la valeur de la probabilité ep .

Chaque scénario de risques conduit à un nouveau processus permettant d'observer les différences d'heure de début (et de fin) des activités par rapport au processus original (ScP_\emptyset).

La figure 4.7 est un arbre de probabilité permettant de représenter les différents scénarios de projet. Le bas de la figure représente un exemple de tournée avec les différentes activités réalisées. Pour chaque activité sont présentés, dans l'arbre de probabilité, les risques qui peuvent l'impacter. Ainsi, pour la première activité Move, deux risques ont été identifiés R_1 et R_2 , pour Activity on site 26 le risque est R_{r-1} et pour le dernier Move le risque est R_r . A chaque nœud de l'arbre, la question est de savoir si le risque appartient au scénario de risques observé ou non. L'écriture \bar{R} correspond au fait que le risque ne survient pas. Sur la figure 4.7, le scénario sans risque noté ScP_\emptyset est présent en bas de l'arbre modélisant la situation où aucun risque ne surviendrait dans la tournée planifiée.

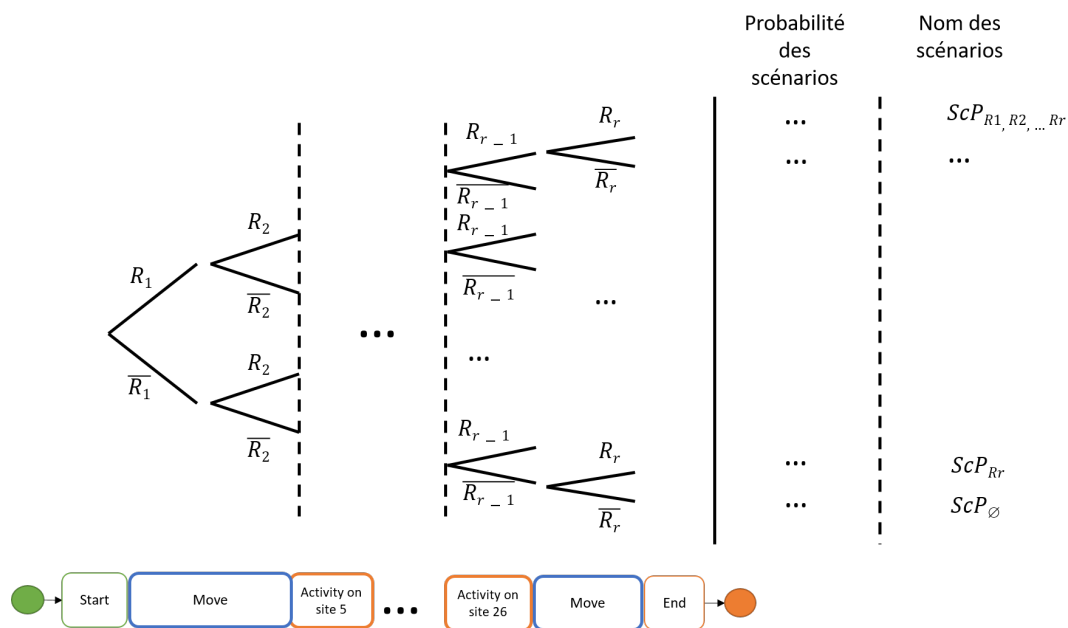


Figure 4.7 – Schéma des probabilités des scénarios de projet

L'intérêt de cette modélisation par un arbre de probabilité est de permettre de visualiser de manière synthétique l'ensemble des scénarios possibles et de faciliter le calcul de la probabilité de chaque scénario. Le calcul des probabilités de chaque branche s'appuie sur une interprétation conceptualisée des probabilités de survenue de chaque risque. C'est-à-dire que pour calculer la probabilité du risque R_2 dans la branche supérieure de l'arbre, il faut se placer dans le cas où R_1 est survenu. Les impacts de ce risque sur la tournée (le scénario) doivent être pris en compte pour déterminer la possibilité d'apparition du risque. En effet, les valeurs de la probabilité et de l'impact d'un risque sont dépendantes de la fenêtre temporelle.

Les valeurs de probabilité ep et d'impact ei sont fournies à partir des fonctions associées à chaque danger permettant la génération d'un risque.

4.3.2 Application de nos hypothèses restrictives à la construction des scénarios de projet

La proposition présentée dans la partie génération des risques formule une hypothèse de présence d'un seul et unique risque pour chaque activité de type statique. Les activités de type dynamique, quant à elles, peuvent être affectées par plusieurs risques. La représentation de la localisation dynamique permet de connaître l'ordre d'apparition des risques et de conserver l'arbre de probabilité présenté.

Dans cette étude, notre proposition est de conserver un seul risque par activité. Pour les activités de type statique nous avons proposé que les zones de dangers soient disjointes. Pour les activités de type dynamique, notre proposition est de ne pas considérer les scénarios ayant plusieurs risques sur la même activité. Cela signifie que si deux risques R_i et R_j impactent une même activité de type dynamique A alors l'ensemble des scénarios comprenant les risques R_i et R_j en même temps ne seront pas simulés et seront exclus de l'analyse.

Cette restriction va conduire à supprimer un certain nombre de branches dans l'arbre de probabilité. Soit l'arbre de probabilité suivant 4.8, avec les risques R_1 et R_2 affectant la même activité Move. Alors, les branches où apparaissent R_1 et R_2 ne sont pas simulées.

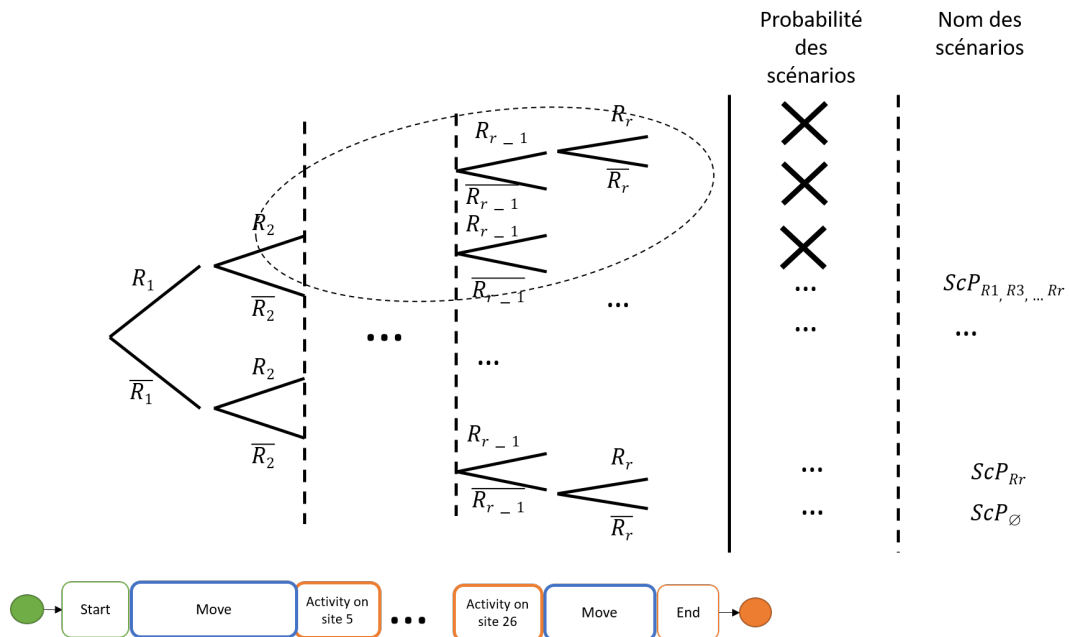


Figure 4.8 – Schéma des probabilités des scénarios de projet restreints

Le nombre de scénarios de projet à évaluer ne dépendra plus uniquement du nombre de risques r mais dépendra également du nombre d'activités ayant deux risques notés

ad. Le nombre de scénarios de projet $Nb_{scenario}$ sera obtenu à partir de l'équation 4.5.

$$Nb_{scenario} = 2^r * \left(\frac{3}{4}\right)^{ad} \quad (4.5)$$

4.4 Évaluation des scénarios de projet

Cette dernière section présente le rôle des activités de type Wait dans l'évaluation d'une tournée. Une fois le rôle des activités Wait expliqué, la présentation d'un exemple permet d'illustrer les scénarios de projet et de les évaluer.

4.4.1 Les activités Wait jouent le rôle de tampon

Comme décrit dans le chapitre 3, les activités Wait sont présentes dans le processus pour que l'enchaînement des activités de la tournée soit continu. Pour rappel, les activités de type Wait sont créées lorsque deux activités successives A_i et A_{i+1} ne sont pas consécutives par rapport à leur horaire. De façon mathématique, si l'heure de début de l'activité A_{i+1} est différente de l'heure de fin de l'activité A_i alors une activité de type Wait est positionnée entre les deux, d'une durée égale à la différence de ces deux horaires. La construction des activités Wait étant dépendante des autres activités, la durée des activités Wait peut être modifiée si des activités de la tournée sont impactées par des risques.

Dans la suite de cette section, différents scénarios de projet sont représentés pour illustrer le comportement des activités de type Wait.

La figure 4.9 illustre la répercussion de l'impact sur une activité de type Wait dans le cas où un risque s'est produit sur l'activité « Move » précédente. On peut constater qu'aucune autre activité n'est impactée par le risque. Cette illustration est détaillée par : un risque R_i avec un impact de durée d sur l'activité A_i . Si A_{i+1} est une activité de type Wait avec une durée D supérieur à d , alors la durée du processus total ne sera pas impactée par le risque R_i .

La figure 4.10 correspond à un exemple d'absorption de l'impact du risque R_j par une activité Wait qui n'est pas successeur direct. La durée totale de la tournée n'est pas impactée mais l'activité A_{i+1} est déplacée par rapport à l'heure de départ originale. Dans ce cas, le constat est que l'heure de début de l'activité Move est modifiée par le risque R_j mais la durée totale de la tournée n'est pas modifiée. Cette illustration est détaillée par : soit le risque R_i avec un impact de durée d sur l'activité A_i mais l'activité de type Wait la plus proche n'est pas A_{i+1} . Conservons l'activité de type Wait avec une durée D supérieure à d . La durée totale du processus est conservée mais d'autres activités peuvent être impactées.

Les deux figures 4.9 et 4.10 permettent de constater que l'activité Wait qui joue un rôle de tampon correspond en réalité à la représentation sur un processus de la marge libre² et de la marge totale³.

2. La marge libre est le retard que peut prendre une activité sans affecter les activités suivantes

3. La marge totale est le retard que peut prendre une activité sans affecter la fin du projet

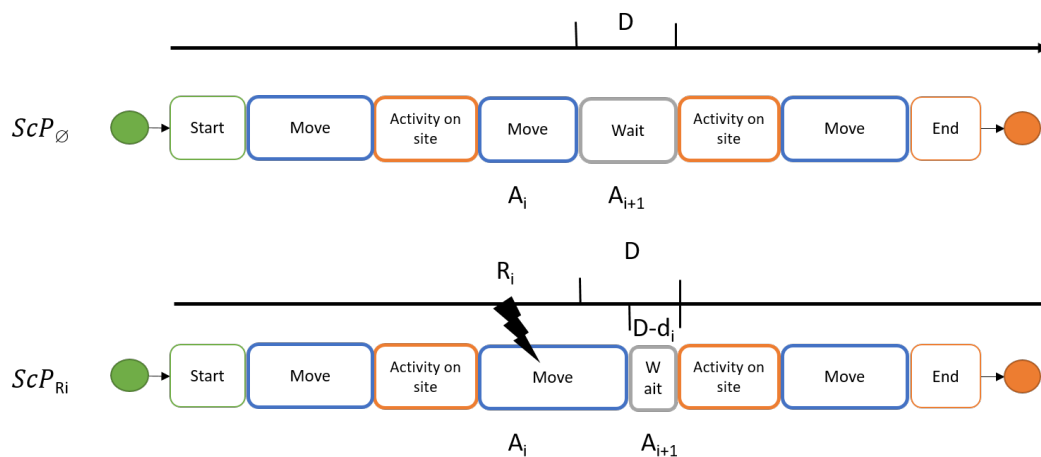


Figure 4.9 – Schéma illustrant la répercussion de l’impact sur une activité Wait successeur direct

La figure 4.11 illustre un cas un peu plus complexe de scénario de projet où plusieurs risques impactent des activités présentes avant une activité de type Wait. Dans ce cas-là, l’activité Wait n’absorbe pas tous les impacts et des répercussions sont présentes sur la tournée comme le décalage de la fin de la tournée. La modélisation mathématique est la suivante : soit un risque R_i avec un impact de durée d sur l’activité A_i et l’activité suivante de type Wait A_j $j > i$ de durée D . Si $D < d$ alors il faut s’intéresser à l’activité de type Wait suivante pour pouvoir réduire cet impact au niveau de la tournée. L’impact du risque peut être réduit à l’aide de plusieurs activités de type Wait. Avec la combinatoire des risques pouvant impacter le processus, il se peut que l’impact des risques ne puisse pas être absorbé par les activités de type Wait présentes. Dans ce cas, la date de fin de la tournée est modifiée.

$$d < \sum_{j=i+1}^a \text{durée}(A_j) * \begin{cases} 1, & \text{if } Type(A_i) = Wait \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (4.6)$$

Soit R_i un risque avec une durée d’impact d sur l’activité A_i et a le nombre d’activités de la tournée T . L’inéquation 4.6 est une condition nécessaire mais pas suffisante pour que l’impact d’un risque soit absorbé par les activités de type Wait. L’équation se traduit littéralement par : l’impact en durée du risque R_i doit être inférieur à la somme des durées des activités de type Wait présentes après l’activité impactée par ce risque.

Cette condition n’est pas suffisante car un risque présent avant l’activité A_i peut avoir consommé les durées des activités de type Wait. De plus, comme le montre la figure 4.11, plusieurs risques peuvent être générés avant une même activité Wait. La durée totale de la tournée peut être impactée alors que la durée des activités de type Wait était suffisante.

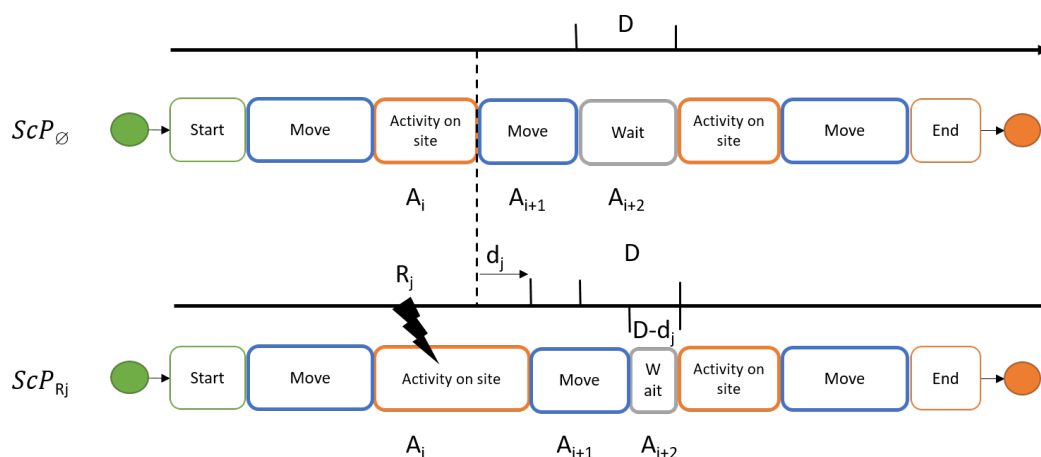


Figure 4.10 – Schéma représentatif de l'absorption de l'impact d'un risque par une activité Wait

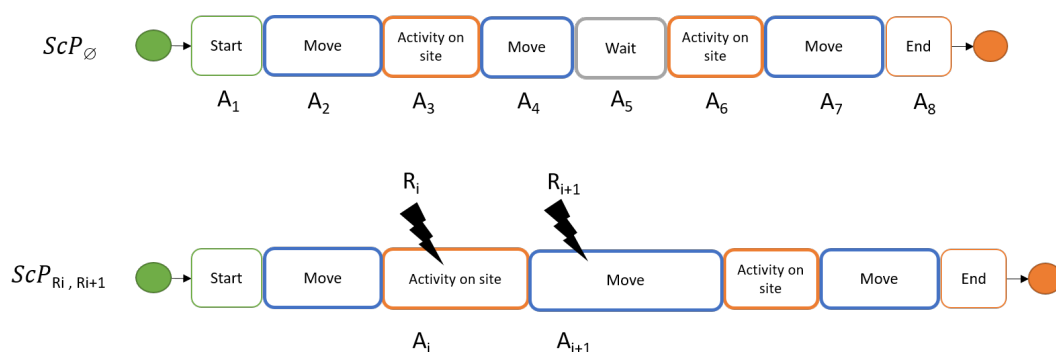


Figure 4.11 – Schéma illustrant que l'impact n'est pas absorbé

4.4.2 Exemple des scénarios de projet sur une tournée

Cette partie est un exemple de plusieurs scénarios de projet résultant de la combinaison des risques. Soit la tournée présentée sur la figure 4.12 réalisée un lundi. Les valeurs des coefficients (*coefProbV* et *coefImpV*) sont égales à 1. Cela signifie que les ressources exposées ne vont pas entraîner d'augmentation ou de diminution de la probabilité et de l'impact. Les valeurs de *ep* et *ei* dépendront uniquement de la fenêtre de temps.

Soit deux risques R_1 et R_2 dont les contextes sont décrits dans les tables 4.4 et 4.5 pour les probabilités d'occurrence des risques et les tables 4.6 et 4.7 pour les impacts des risques sur les activités, affectant respectivement les activités A_2 et A_3 .

La construction des scénarios des risques possibles avec ces deux risques conduit à quatre scénarios de projet (2^2). Le scénario de base dans lequel ne survient aucun risque est noté ScP_\emptyset . Une fois les 4 scénarios simulés selon les impacts des différents risques pris en compte, les probabilités de chaque scénario peuvent être calculées en suivant le principe de l'arbre de probabilité. Le scénario ScP_{R_1, R_2} montre que lorsque

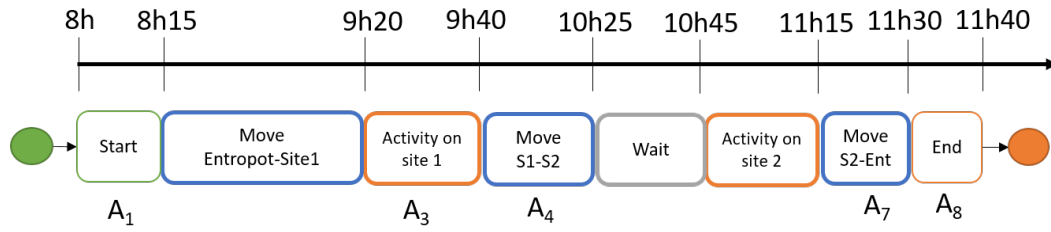


Figure 4.12 – Représentation d’une tournée sur une frise chronologique

Table 4.4 – Fonction de probabilité (%) $F_{probaR1}$

Ordre		8h-9h30	9h30-11h
1	Lundi	30	15
2	Mardi	20	10
3	Mercredi, Jeudi et Vendredi	30	30

le risque R_1 est pris en compte, l’activité suivante A_3 change de plage horaire pour le risque R_2 .

La table 4.8 correspond aux différents scénarios qui se réalisent avec les deux risques pris en exemple le lundi matin. Les probabilités sont calculées par rapport à l’arbre de probabilité et l’ordre chronologique des risques. Les équations 4.7, 4.8, 4.9 et 4.10 permettent de voir le détail des calculs pour les probabilités des quatre scénarios. Pour la probabilité du risque R_2 , la plage horaire sélectionnée est la première (8h-9h30) lorsque R_1 n’est pas présent et la deuxième plage horaire (9h30-11h) lorsque R_1 est présent. La présence du risque R_1 décale le début de l’activité A_3 dans la deuxième plage horaire.

$$Proba(ScP_{\emptyset}) = Proba(\bar{R}_1) * Proba(\bar{R}_2|\bar{R}_1) = 0.7 * 0.8 = 56\% \quad (4.7)$$

$$Proba(ScP_{R_1}) = Proba(R_1) * Proba(\bar{R}_2|R_1) = 0.3 * 0.75 = 22.5\% \quad (4.8)$$

$$Proba(ScP_{R_2}) = Proba(\bar{R}_1) * Proba(R_2|\bar{R}_1) = 0.7 * 0.2 = 14\% \quad (4.9)$$

$$Proba(ScP_{R_1,R_2}) = Proba(R_1) * Proba(R_2|R_1) = 0.3 * 0.25 = 7.5\% \quad (4.10)$$

Table 4.5 – Fonction de probabilité (%) $F_{probaR2}$

Ordre		8h-9h30	9h30-11h
1	Lundi	20	25
2	Mardi	20	15
3	Mercredi, Jeudi et Vendredi	15	30

Table 4.6 – Fonction d'impact (minutes) $F_{impactR1}$

Ordre		8h-9h30	9h30-11h
1	Lundi	15	20
2	Mardi	20	15
3	Mercredi, Jeudi et Vendredi	25	10

Table 4.7 – Fonction d'impact (minutes) $F_{impactR2}$

Ordre		8h-9h30	9h30-11h
1	Lundi	20	30
2	Mardi	25	40
3	Mercredi, Jeudi et Vendredi	15	25

Dans la dernière colonne de la table 4.8, les différents scénarios sont représentés. Pour les scénarios ScP_{R_1} et ScP_{R_2} l'activité Wait absorbe entièrement l'impact du risque même si l'activité de type Wait disparaît entièrement dans le scénario ScP_{R_2} . La fin de la tournée n'est pas modifiée. En revanche pour le scénario ScP_{R_1,R_2} , l'activité de type Wait n'a pas suffi. La tournée est modifiée finissant 25 minutes plus tard que le scénario initial (ScP_{\emptyset}).

4.4.3 Analyse des résultats des scénarios sur une tournée

La table 4.8 donne une représentation des différents scénarios pouvant se produire sur une tournée. A partir du modèle d'agrégation des indicateurs présenté dans le chapitre 3, il est possible de mesurer les mêmes indicateurs que sur le processus original représenté par le scénario ScP_{\emptyset} .

Prenons des indicateurs comme la durée de travail correspondant à l'amplitude horaire de la tournée, le temps de conduite correspondant à la somme des durées des activités de type Move et le temps d'attente du conducteur correspondant à la somme des durées des activités Wait.

La table 4.9 est un exemple des différents indicateurs pouvant être représentés pour chaque scénario. Seul le scénario ScP_{R_1,R_2} a une durée totale plus importante que le scénario d'origine ScP_{\emptyset} . Le scénario ScP_{R_2} n'a plus de durée d'attente mais a conservé son temps de conduite.

Cette représentation met en évidence que les Activity on Site correspondant aux activités de livraison du client initialement planifiées à une heure précise peuvent être modifiées comme le montrent les scénarios ScP_{R_1} et ScP_{R_1,R_2} . L'Activity on Site initialement planifiée à 9h20 est déplacée pour un début à 9h35. Ce phénomène peut nuire à la satisfaction du client. C'est donc à partir de la satisfaction du client que les différents indicateurs de robustesse présentés dans le chapitre 5 vont être élaborés.

Table 4.8 – Récapitulatif des scénarios de projet

Scénario	Probabilité	Représentation de la tournée
ScP_{\emptyset}	56%	
ScP_{R_1}	22.5 %	
ScP_{R_2}	14%	
ScP_{R_1,R_2}	7.5%	

Table 4.9 – Évaluation des scénarios de projet

Scénario	Durée travaillée	Temps de conduite	Temps d'attente
ScP_{\emptyset}	3h40	2h05	20
ScP_{R_1}	3h40	2h20	5
ScP_{R_2}	3h40	2h05	0
ScP_{R_1,R_2}	4h05	2h20	0

Conclusion

Le chapitre 4 présente un modèle basé sur le concept de danger permettant de générer automatiquement les risques sur un planning. Nous définissons un danger comme toute source de dommages potentiels ayant pour conséquence de modifier les caractéristiques d'un élément du système. La modélisation du danger permet donc de définir un contexte global à tous les plannings conçus pour être exécutés sur la localisation et la même période de temps observées. L'identification des risques est suivie par la génération des scénarios de projet où notre proposition est de modéliser un seul risque pour les activités de type statique et d'exclure les scénarios où plusieurs risques sont présents sur une même activité. L'ensemble des scénarios de projet est simulé par ordre chronologique d'apparition des risques pour permettre de calculer les fonctions de probabilité et d'impact. La représentation des différents scénarios de projet est un atout majeur pour calculer les indicateurs attribués à une tournée comme sa durée totale et permettre une bonne appréhension de ceux-ci par le planificateur. Par le système d'agrégation présenté chapitre 3, il est possible

d'obtenir les valeurs des indicateurs d'un planning journalier à partir des différentes tournées qui le composent.

La répercussion des événements (en modifiant les heures de livraison) observée dans les scénarios de projet et mesurée par les indicateurs peut être le signe d'une insatisfaction des clients. Les indicateurs de robustesse présentés dans le chapitre 5 ont pour rôle de tenir compte des impacts des risques pouvant modifier l'évaluation d'un planning. Ainsi, l'évaluation est plus représentative de la réalité donnant au planificateur une meilleure vision quant aux résultats de ses propositions dans la réalité.

Chapitre 5

Proposition d'indicateurs de robustesse

Introduction

L'objectif de ce chapitre est de répondre à l'une des questions de recherche liées à notre problématique. Cette question se décline en : « Quels indicateurs permettent de caractériser la capacité d'un planning à résister aux perturbations ? »

Comme vu dans le chapitre 4, la prise en compte des risques modifie de manière significative un planning. Par conséquent, les indicateurs qui qualifient ce planning sont susceptibles d'être modifiés par l'apparition d'évènements perturbateurs. D'où l'intérêt d'avoir des indicateurs permettant au planificateur d'évaluer la résistance aux perturbations de ce planning.

Ces indicateurs permettent de garantir que le planning choisi est conforme à certaines exigences de nature économique, environnementale, sociétale. A titre illustratif, le respect de l'heure de livraison est un élément clé pour la satisfaction client. Cette exigence est prise en compte dans de tels indicateurs.

Dans ce chapitre, nous proposons trois indicateurs de robustesse dans le but de répondre aux attentes du planificateur. Ces dernières sont diverses mais peuvent se résumer en :

- une garantie sur la conformité de son planning, c'est-à-dire de connaître le pourcentage de réalisation du planning où l'ensemble de ses clients sont satisfaits ;
- une connaissance sur le minimum de satisfaction que peut obtenir son planning si des aléas perturbent le planning choisi ;
- une indication sur le retard maximal que peut avoir une livraison chez un client.

Les indicateurs de robustesse dépendent du retard susceptible d'être négocié par le planificateur auprès du client.

Une analyse est nécessaire lorsque les seuils définis par le planificateur ne sont pas atteints par les valeurs calculées des indicateurs de robustesse. La finalité de

l'analyse est de proposer des leviers d'amélioration pour se rapprocher des seuils du planificateur. Nous proposons donc une démarche d'analyse qui illustre l'ensemble des situations dans lesquelles les indicateurs peuvent se trouver. Cette démarche permet au planificateur de pouvoir négocier le retard potentiellement admissible par le client.

Le chapitre est composé de trois sections. La section 5.1 expose les attentes du planificateur par rapport aux indicateurs permettant d'évaluer la robustesse de son planning journalier. A partir des attentes observées et de la simulation des scénarios de risques présentés dans le chapitre 4, la section 5.2 se focalise sur notre proposition d'indicateurs de robustesse. Et enfin, la section 5.3 s'efforce de présenter des pistes d'amélioration des indicateurs de robustesse.

5.1 Les attentes du planificateur

5.1.1 Un constat sur les indicateurs du planning

Face à plusieurs plannings journaliers, le planificateur se doit d'en sélectionner un pour exécuter les commandes du lendemain. Pour cela, il peut s'appuyer sur son expertise et sur des indicateurs globaux représentatifs des plannings en concurrence. Ces indicateurs peuvent représenter par exemple des dimensions économiques, environnementales ou santé sécurité au travail tels que présentés dans le chapitre 3.

Les hypothèses formulées (niveau de trafic, disponibilité des clients pour effectuer la réception des livraisons...) lors de l'élaboration de ces plannings peuvent être remises en cause lors de l'exécution des tournées. Ces changements, tels qu'étudiés au chapitre 4, ont pour effet de modifier les durées de trajet, des activités de déchargement et par voie de conséquence de rendre la tournée non satisfaisante vis-à-vis des objectifs fixés (respect d'un créneau horaire de livraison par exemple) voire irréalisable.

La figure 5.1 illustre ce constat. Le planning attendu à gauche de la figure représente la solution que le planificateur espère réaliser. Ce planning est exécuté dans un contexte risqué où les risques sont représentés sous la forme d'éclairs. Après l'exécution, l'observation permet d'avoir un planning réalisé. Les valeurs des indicateurs entre le planning attendu et le planning réalisé sont différentes, entre autres, à cause de l'impact des risques sur le planning.

Pour limiter les impacts de ces perturbations et par effet induit les valeurs des indicateurs, le planificateur passe 11% de son temps à négocier avec le client lorsque la réalisation du planning ne se passe pas comme prévu¹ afin de limiter les effets induits. Il cherche ainsi à maintenir un niveau de satisfaction correct du client (négociation d'un délai supplémentaire pour le créneau de livraison par exemple, ou ajustement de la tournée).

Cette négociation est effectuée au fil de l'eau selon les perturbations rencontrées, fréquemment dans un contexte d'urgence et de stress. Afin de réduire fortement ce temps et les désagréments occasionnés pour le planificateur (stress) et pour le client, nous proposons d'étudier et de définir de nouveaux indicateurs pour évaluer la robustesse a priori d'un planning dans un contexte risqué.

5.1.2 De nouveaux indicateurs pour caractériser les plannings journaliers dans un contexte risqué

L'indicateur recherché a pour objectif principal de caractériser la capacité d'un planning à respecter les engagements pris par la société de transport vis-à-vis du client. Ces engagements peuvent porter par exemple sur le respect de la plage horaire de livraison telle que définie avec le client au moment de la prise de commande.

1. Étude menée par l'INRS dans le cadre du projet ANR Smart Planning

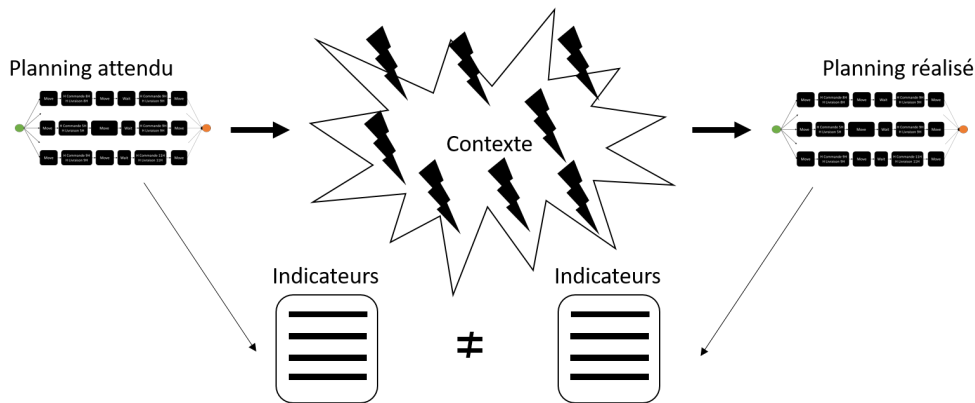


Figure 5.1 – Différence des indicateurs a priori et a posteriori

En outre, si les valeurs des indicateurs de robustesse ne sont pas satisfaisantes pour le planificateur, ils doivent permettre au planificateur de situer le problème. Enfin, ces indicateurs doivent offrir au planificateur des leviers d'amélioration pour augmenter la robustesse du planning. Pour définir nos indicateurs, nous nous référons à l'impact des risques sur la satisfaction client.

Pour atteindre ces objectifs, nous proposons de formuler des indicateurs qui s'appuient sur les risques identifiés, à l'aide des mécanismes présentés dans le chapitre 4, leurs impacts sur la satisfaction du client et leurs caractéristiques. Ils doivent prendre en compte les risques pouvant affecter chaque planning et rendre explicite le niveau de robustesse d'un planning dans un contexte risqué.

La figure 5.2 vient illustrer notre proposition d'ajouter un indicateur supplémentaire, prenant en compte les risques, pour permettre au planificateur d'avoir une perception de la robustesse du planning face aux potentiels aléas que la tournée pourrait rencontrer.

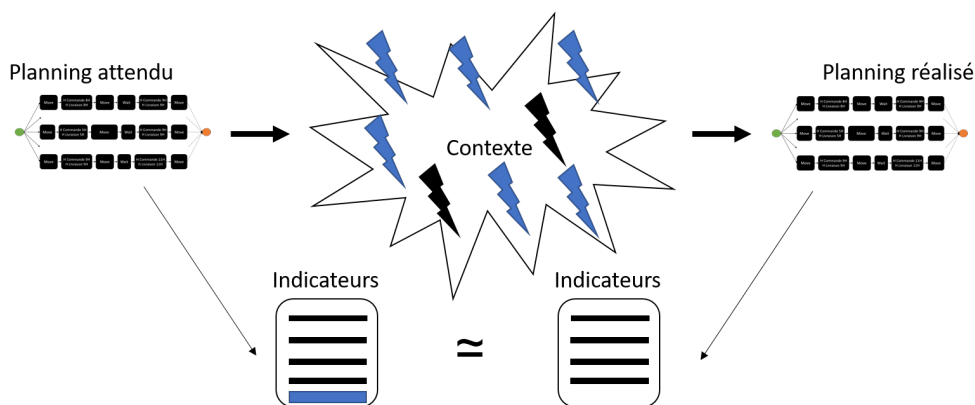


Figure 5.2 – Proposition d'indicateurs pour caractériser la capacité d'un planning à respecter les engagements dans un contexte risqué

Nous définirons la capacité du planning à respecter les engagements pris vis-à-vis du client comme la robustesse du planning face aux aléas.

5.2 Proposition d'indicateurs de robustesse dans le TRM

Dans le chapitre 2, nous avons présenté un état de l'art de la robustesse introduisant trois types de robustesse. La robustesse de type 1 correspond à une invariance de l'indicateur mesuré face aux perturbations, la robustesse de type 2 correspond à une évolution de l'indicateur mesuré dans une zone de robustesse acceptable et la robustesse de type 3 considère une invariance de la fonction principale tandis que les fonctions secondaires ne sont pas observées. Afin de caractériser la robustesse des plannings, nous avons choisi de nous intéresser à la robustesse de type 2. Pour rappel, un système est considéré de robustesse de type 2 s'il conserve une performance dans une zone acceptable définie pour le système face à des perturbations.

Ce type de robustesse est le mieux adapté à notre domaine d'application car l'indicateur que nous avons décidé de mesurer est la satisfaction du client. Pour qu'un client soit satisfait, il faut que la commande soit livrée dans la plage horaire initialement prévue. La robustesse de type 1 serait de proposer un indicateur permettant de qualifier directement le planning. Cependant, nous proposons une phase de négociation avec le client qui va permettre d'obtenir un délai de retard autorisé. Ce dernier permet de définir une zone dans laquelle le client continue à être satisfait. Cette zone représente la zone de robustesse de la robustesse de type 2. Nos indicateurs de robustesse vont mesurer la capacité d'un planning à respecter l'heure de livraison de chaque commande dans un contexte risqué. Ils seront évalués en fonction du temps de retard négocié avec le client. Ce temps de retard négocié correspond à la zone acceptable de l'indicateur de robustesse type 2.

5.2.1 La robustesse au niveau d'un planning et d'une tournée

Une solution sélectionnée par un planificateur correspond à un planning journalier. Comme présenté dans le modèle de données (chapitre 3), un planning est composé d'un ensemble de tournées. Une hypothèse du chapitre 4 est qu'un risque n'affecte qu'une seule activité. Comme les activités sont liées les unes aux autres, un risque peut affecter toute une tournée. Chaque tournée peut être considérée comme un processus indépendant. Un planning journalier cherche à satisfaire de manière globale l'ensemble des objectifs des clients.

Notre proposition est d'estimer des indicateurs de robustesse au niveau d'une tournée, puis par agrégation, d'estimer les indicateurs de robustesse au niveau d'un planning. Nous posons donc comme hypothèse que la robustesse du planning est liée à la robustesse de ses tournées.

5.2.2 Définir les limites d'un planning

Pour évaluer la robustesse d'un planning, nous souhaitons mesurer l'écart entre le planning initialement prévu et les différents plannings possibles induits par les

scénarios de risques potentiels. Cette mesure va permettre lors du choix de la planification que les indicateurs du planning initialement prévu soient proches des indicateurs du planning réalisé comme l'illustre la figure 5.2.

Dans ce travail, nous considérons que le client est satisfait si la livraison est effectuée en respectant la contrainte horaire de la commande. Pour rappel, la commande d'un site doit respecter une heure de livraison. Cette heure de livraison est représentée par une plage horaire ou par une heure fixe. Cette plage horaire ou heure fixe est la contrainte horaire de la commande. Notre choix est donc de montrer quel serait l'écart maximum entre l'heure de livraison attendue et l'heure de livraison induite par les risques générés sur le planning.

Notre proposition est de traiter dans un premier temps les scénarios de risques d'une tournée puis ensuite de nous intéresser à l'évaluation de la robustesse au niveau planning journalier.

Dans chaque scénario de projet, les heures de livraison de certaines commandes peuvent être modifiées, par rapport à celles prévues dans la tournée initialement planifiée. L'heure de livraison dans un scénario de projet sera nommée heure de livraison induite.

Si l'heure de livraison induite respecte la contrainte horaire, alors nous considérons qu'il n'y a pas de retard pour le client. Dans le cas contraire, l'heure de livraison induite ne respecte pas la contrainte horaire, la livraison ne peut pas être honorée et la satisfaction du client baisse. Nous nous intéresserons à la durée de retard par rapport à la contrainte horaire de la livraison. Pour chaque scénario de projet ScP_s , les livraisons ne respectant pas la contrainte horaire sont évaluées selon le retard de livraison. Une tournée pouvant avoir plusieurs livraisons en retard, nous noterons le retard d'un scénario de projet d'une tournée $delay(ScP_s)$ correspondant au plus grand retard sur le scénario.

La figure 5.3 illustre les scénarios de projet pouvant se réaliser sur une tournée. A gauche de la figure se trouve la tournée initiale. Après application des risques, les scénarios de projet peuvent présenter des retards sur les livraisons. Le premier scénario montre un retard de 10 minutes, le retard est donc de 10 minutes. Pour le deuxième scénario illustré, deux livraisons sont en retard la première de 15 minutes et la deuxième de 5 minutes. Le retard du scénario de projet est donc de 15 minutes car la deuxième livraison a moins de 15 minutes de retard par rapport à la contrainte horaire.

Table 5.1 – Indicateur du retard des scénarios de risques

Scénario	Retard maximum
ScP_\emptyset	$delay(ScP_\emptyset)$
...	...
ScP_s	$delay(ScP_s)$
...	...
ScP_{2r}	$delay(ScP_{2r})$

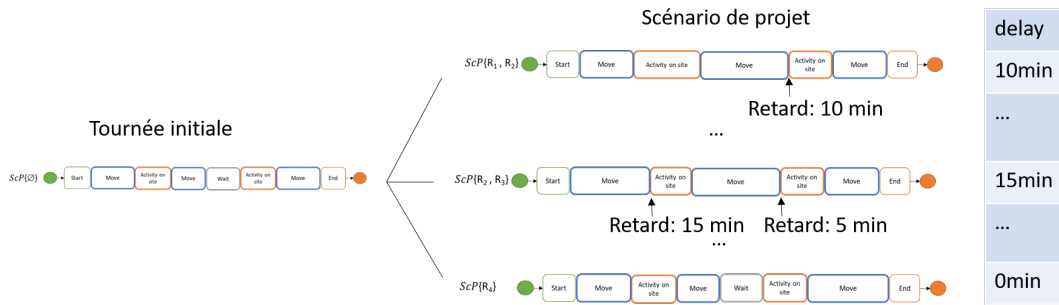


Figure 5.3 – Représentation des retards de livraison par rapport aux scénarios de projet

La table 5.1 indique que chaque scénario de risques (ScP_s) peut être caractérisé par le retard maximum ($delay(ScP_s)$) des livraisons d'une tournée par rapport à la contrainte horaire de la commande. Pour illustrer les formules présentes dans ce chapitre, le nombre de scénarios de projet sera 2^r . Si la construction d'une tournée respecte les contraintes horaires, alors le retard $delay(ScP_\emptyset)$ est égal à zéro.

Pour caractériser une tournée par rapport au retard sur les livraisons qui peuvent être présentes, nous proposons l'indicateur $TMaxDelay_t$. Cet indicateur représente le retard maximum constaté sur l'ensemble des scénarios pour les livraisons de la tournée t par rapport à l'heure de livraison attendue (équation 5.1). Ce retard correspond au maximum des retards de l'ensemble des scénarios de risques appliqués à cette tournée.

$$TMaxDelay_t = \max_{s \in 1..2^r} [delay(ScP_s)] \quad (5.1)$$

Le planning journalier correspond à l'ensemble des tournées. Par une agrégation, le retard maximum sur un planning correspond au maximum des retards constatés sur l'ensemble des tournées.

Nous proposons l'indicateur $SMaxDelay_{ds}$ qui représente le retard maximum sur les livraisons du planning journalier ds par rapport à l'heure des livraisons prévue (équation 5.2).

$$SMaxDelay_{ds} = \max_{t \in ds} TMaxDelay_t \quad (5.2)$$

5.2.3 Mesurer la satisfaction du client

L'une des contraintes principales pour la satisfaction des clients est l'heure de livraison. Lorsque cette heure de livraison n'est pas respectée, le client peut demander différentes compensations. Celle-ci est souvent financière par une pénalité. Mais le client peut refuser la livraison et demander à être livré le lendemain pour que la livraison ne perturbe pas son activité actuelle. Cette nouvelle planification est à la fois un préjudice financier pour l'entreprise de transport car la livraison est réalisée deux

fois, mais également un préjudice sur l'organisation car la livraison vient se rajouter aux livraisons du lendemain. Savoir si la livraison va se dérouler sans être perturbée est un point fort pour la satisfaction du client et de l'entreprise de transport.

La section précédente a permis de définir le retard maximum des livraisons sur l'ensemble des scénarios de projet d'une tournée. Un des besoins des indicateurs de robustesse est de mesurer la satisfaction du client. Dans un premier temps, nous allons nous intéresser au scénario de projet dont les livraisons ne sont pas impactées par les risques. Notre proposition va s'intéresser à la probabilité d'occurrence des différents scénarios de risques d'une tournée dans l'objectif de connaître le pourcentage de scénarios de projet qui ne sont pas impactés.

Pour chaque scénario possible d'une tournée, nous proposons de compléter sa caractérisation, proposée initialement dans le tableau 5.1, avec sa probabilité d'occurrence $proba_t(ScP_s)$ (voir tableau 5.2).

Table 5.2 – Caractérisation des scénarios d'une tournée : probabilité d'occurrence et retard maximum

Scénario	Retard maximum	Probabilité
ScP_0	$delay(ScP_1)$	$proba_t(ScP_0)$
...
ScP_s	$delay(ScP_s)$	$proba_t(ScP_s)$
...
ScP_{2r}	$delay(ScP_{2r})$	$proba_t(ScP_{2r})$

A partir des différentes caractéristiques des scénarios présentées précédemment, le constat est qu'une partie des scénarios peut respecter la satisfaction du client. La probabilité d'occurrence des scénarios exprime la probabilité qu'un scénario puisse se réaliser. Nous proposons donc un indicateur de robustesse $TProbRespect_t(x)$ mesurant la probabilité qu'une tournée prévue soit en capacité de satisfaire la contrainte horaire des clients avec une marge de x minutes (équation 5.3). L'évaluation de cette probabilité dépend entre autres de la probabilité de réalisation de chaque scénario de risques associé à cette tournée. L'espace de valeur de $TProbRespect_t(x)$ est compris entre 0 et 100, la valeur 0 indique que dans ce scénario aucune livraison ne respecte les contraintes horaires, une valeur de 100 indique que toutes les livraisons de ce scénario respectent les contraintes horaires.

Un scénario ayant un retard $delay(ScP_s)$ inférieur au temps x négocié par le planificateur avec le client est en mesure de satisfaire toutes les contraintes horaires. Dans ce cas, la probabilité de respect du planning augmente de la probabilité d'occurrence du scénario ScP_s .

$$TProbRespect_t(x) = \sum_{s=1}^{2r} proba_t(ScP_s) * \begin{cases} 1, & \text{if } delay(ScP_s) \leq x \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (5.3)$$

La valeur de $TProbRespect_t(0)$ correspond à la probabilité de respect du planning sans négociation avec le client, il s'agit de vérifier si la tournée telle que planifiée permet de respecter toutes les contraintes horaires des commandes à livrer. Plus le délai négocié par le planificateur avec le client sera important (x grand), plus le nombre de scénarios de tournées satisfaisant les contraintes horaires sera élevé.

Chaque scénario est caractérisé par le retard $delay(ScP_s)$ qui permet de mesurer le retard maximum des livraisons dans ce scénario. Cette valeur permet d'aider à identifier le temps x à négocier pour que le scénario satisfasse les contraintes horaires du client. Le temps maximum à négocier pour qu'une tournée satisfasse toutes les contraintes horaires des livraisons dans tous les cas, c'est-à-dire quels que soient les événements qui pourraient apparaître parmi la liste de dangers pré-identifiés, correspond au retard maximum de tous les scénarios possibles pour la tournée t . Ce temps est noté $TMaxdelay_t$.

En s'appuyant sur la probabilité de respect des contraintes horaires au niveau tournée, notée $TProbRespect_t(x)$, il est possible de déterminer la probabilité de respect des contraintes horaires au niveau du planning journalier, notée $SProbRespect_{ds}(x)$. $SProbRespect_{ds}(x)$ est la probabilité d'un planning journalier où l'ensemble des contraintes horaires des clients est satisfait avec une marge de x minutes (équation 5.4). Cette probabilité est obtenue par le produit des probabilités de respect des contraintes horaires de chaque tournée composant le planning journalier.

$$SProbRespect_{ds}(x) = \prod_{t \in DS} TProbRespect_t(x) \quad (5.4)$$

Ces indicateurs permettent d'identifier les scénarios de tournées qui respectent les contraintes horaires. Maintenant que les scénarios qui respectent les contraintes sont décrits, il faut décrire plus précisément les scénarios de tournées qui ne respectent pas cette contrainte horaire.

Notre proposition pour le dernier indicateur de robustesse est de décrire la pire situation présente dans les scénarios qui ne respectent pas les exigences du client.

Pour répondre à ce besoin, il faut évaluer les scénarios de risques de la tournée en fonction du nombre de livraisons $TNbDel_t$ présent dans la tournée, du nombre de livraisons satisfaisant la contrainte horaire avec moins de x minutes de retard $TSat_t(ScP_s, x)$. Le ratio de ces deux nombres permet d'obtenir le pourcentage de livraisons satisfaisant les contraintes horaires dans chaque scénario de risques.

Le tableau 5.3 permet de visualiser l'ensemble des indicateurs proposés pour chaque scénario de risques afin d'évaluer les indicateurs de robustesse. Avec $TNbDel_t$ le nombre de commandes devant être livrées dans la tournée t et $TSat_t(ScP_s)$ le nombre de livraisons satisfaisant la contrainte horaire dans le scénario ScP_s de la tournée t .

Notre deuxième indicateur de robustesse est $TMinSat_t(x)$. Il représente le pourcentage minimum de livraisons de la tournée t respectant les contraintes horaires des

Table 5.3 – Indicateurs de probabilité des scénarios de projet

Scéna-rio	Retard maximum	Probabilité	Nb de livraisons	Nb satisfaites	% de satisfaction
ScP_{\emptyset}	$\text{delay}(ScP_1)$	$\text{proba}_t(ScP_{\emptyset})$	$TNbDel_t$	$TSat_t(ScP_{\emptyset}, x)$	$\frac{TSat_t(ScP_{\emptyset}, x)}{TNbDel_t}$
...
ScP_s	$\text{delay}(ScP_s)$	$\text{proba}_t(ScP_s)$	$TNbDel_t$	$TSat_t(ScP_s, x)$	$\frac{TSat_t(ScP_s, x)}{TNbDel_t}$
...
ScP_{2r}	$\text{delay}(ScP_{2r})$	$\text{proba}_t(ScP_{2r})$	$TNbDel_t$	$TSat_t(ScP_{2r}, x)$	$\frac{TSat_t(ScP_{2r}, x)}{TNbDel_t}$

clients pour tous les scénarios de risques, avec une marge de x minutes (équation 5.5).

$$TMinSat_t(x) = \min_{s \in 1..2r} \frac{TSat_t(ScP_s, x)}{TNbDel_t} \quad (5.5)$$

Pour évaluer le niveau planning journalier, notre proposition est de définir le nombre minimal de livraisons du planning journalier ds respectant les contraintes horaires des clients pour tous les scénarios de risques, avec une marge de x minutes. Cet indicateur sera noté $SMinSat_{ds}(x)$ (voir équation 5.6). Le numérateur de l'équation permet de déterminer le nombre minimum de livraisons satisfaisant les contraintes horaires pour l'ensemble des tournées. Le dénominateur correspond au nombre de livraisons réalisées dans le planning journalier c'est-à-dire à la somme des livraisons de chaque tournée.

$$SMinSat_{ds}(x) = \frac{\sum_{t \in ds} TMinSat_t(x) * TNbDel_t}{\sum_{t \in ds} TNbDel_t} \quad (5.6)$$

5.3 Démarche d'utilisation des indicateurs de robustesse

Nous venons de présenter les trois indicateurs de robustesse, $SMaxDelay_{ds}$ correspondant au retard maximum des livraisons par rapport à l'ensemble des scénarios de projet, $SProbRespect_{ds}(x)$ correspondant à la probabilité qu'un planning respecte les contraintes horaires du client avec un délai de x minutes, et $TMinSat_t(x)$ correspondant au pourcentage minimum de livraisons satisfaites avec un retard de moins de x minutes. Ils permettent de caractériser à la fois le niveau de la tournée et celui du planning journalier.

Après avoir défini et présenté ces indicateurs de robustesse, l'objectif de cette section est de donner au planificateur des éléments permettant de savoir comment il doit manipuler ces indicateurs et comment ceux-ci peuvent l'aider à déterminer les

situations propices à une négociation avec le client. Pour cela, nous allons illustrer différents cas d'évolution possible de ces indicateurs de robustesse. Les indicateurs de la tournée $TProbRespect_t(x)$ et $TMinSat_t(x)$ ont le même rôle que les indicateurs du planning journalier $SProbRespect_{ds}(x)$ et $SMinSat_{ds}(x)$. Cette section présente uniquement les négociations au niveau du planning journalier. Le même principe peut être appliqué pour la tournée.

5.3.1 Représentation des indicateurs de robustesse

Pour un planning, $SProbRespect_{ds}(0)$ et $SMinSat_{ds}(0)$ sont les valeurs des indicateurs de robustesse avant négociation. Ces deux valeurs sont comprises entre 0 et 100.

Nous pouvons donc maintenant positionner l'ensemble des plannings journaliers générés sur un plan composé des deux dimensions $SProbRespect_{ds}(0)$ et $SMinSat_{ds}(0)$. Nous poserons $PR+$ comme la zone dans laquelle $SProbRespect_{ds}(x)$ est considéré comme acceptable par le planificateur, $PR-$ la zone dans laquelle $SProbRespect_{ds}(x)$ n'est pas considéré comme acceptable par le planificateur, $MS+$ la zone dans laquelle $SMinSat_{ds}(x)$ est considéré comme acceptable par le planificateur et $MS-$ zone dans laquelle $SMinSat_{ds}(x)$ n'est pas considéré comme acceptable par le planificateur.

La figure 5.4 illustre une telle représentation. L'axe des abscisses correspond aux valeurs possibles de $SMinSat_{ds}(0)$. Sur cet axe, les zones $MS-$ et $MS+$ sont représentées, correspondant respectivement aux zones dans lesquelles $SMinSat_{ds}(x)$ n'est pas considéré comme acceptable par le planificateur et la zone où il est considéré comme acceptable. La délimitation des zones $MS-$ et $MS+$ est au choix du planificateur. Cette délimitation correspond à la valeur à partir de laquelle le planificateur considère la solution comme acceptable selon l'indicateur $SMinSat_{ds}(x)$.

L'axe des ordonnées correspond aux valeurs possibles de $SProbRespect_{ds}(0)$. Sur cet axe, les zones $PR-$ et $PR+$ sont représentées, correspondant respectivement aux zones dans lesquelles $SProbRespect_{ds}(x)$ n'est pas considéré comme acceptable par le planificateur ou est considéré comme acceptable. La délimitation des zones $PR-$ et $PR+$ est au choix du planificateur. Cette délimitation correspond à la valeur à partir de laquelle le planificateur considère la solution comme acceptable selon l'indicateur de probabilité de respect d'un planning $SProbRespect_{ds}(x)$. La combinaison de ces zones ($PR-$, $PR+$, $MS-$ et $MS+$) permet de définir les quatre situations possibles sur la figure 5.4 et décrites par la suite.

Les situations présentes dans la zone $PR+$ sont les situations 1 et 2 tandis que les situations dans la zone $PR-$ sont les situations 3 et 4. Pour l'indicateur du minimum de satisfaction, les situations 1 et 3 sont considérées comme acceptables pour cet indicateur (zone $MS+$) tandis que les situations 2 et 4 sont situées dans la zone non acceptable $MS-$.

La situation 1 correspond à des valeurs de robustesse présentes dans les zone $PR+$ et $MS+$. Cette situation signifie que la probabilité que le planning se passe bien est élevée et que si les risques impactant le planning se produisent, il y aura peu de retard par rapport aux heures de livraison souhaitées par le client.

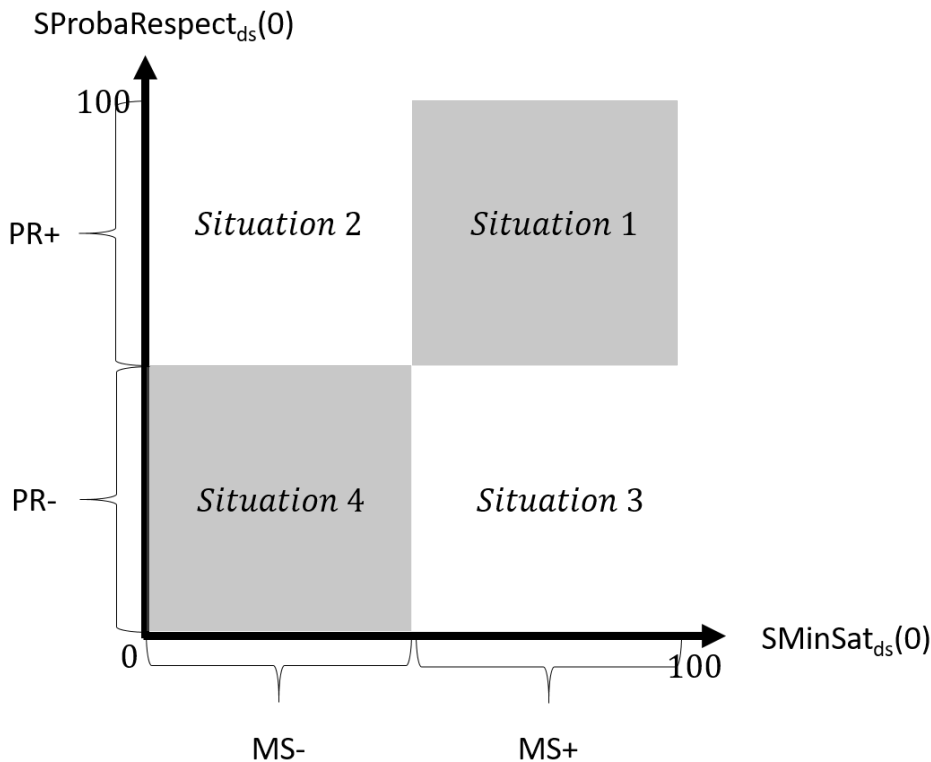


Figure 5.4 – Cartographie des indicateurs de robustesse avant négociation

La situation 2 correspond à un positionnement de la valeur de l'indicateur de probabilité $SProbaRespect_{ds}(0)$ dans la zone $PR+$ c'est à dire acceptable pour le planificateur. Mais, comme la valeur de l'indicateur du minimum de satisfaction $SMinSat_{ds}(0)$ est dans la zone $MS-$, le planning n'est pas considéré comme acceptable au regard de l'indicateur $SMinSat_{ds}(x)$. Cette situation signifie que le planning a une grande probabilité de satisfaire le client mais si cette satisfaction n'est pas respectée alors de nombreux clients seront impactés.

La situation 3 est l'inverse de la situation 2. La valeur de la probabilité de respect du planning $SProbaRespect_{ds}(0)$ est dans la zone de $PR-$ et l'indicateur du minimum de satisfaction $SMinSat_{ds}(0)$ est dans la zone acceptable c'est à dire $MS+$. Cela signifie que le planning a une probabilité faible de respecter tous les engagements. Cependant, si ces engagements ne sont pas respectés, peu de clients seront impactés car le minimum de satisfaction est acceptable.

La situation 4 correspond à la situation la plus délicate pour un planning journalier car les indicateurs de robustesse sont initialement faibles. La probabilité de respect $SProbaRespect_{ds}(0)$ et un minimum de satisfaction $SMinSat_{ds}(0)$ sont situés dans les zones non acceptables par le planificateur ($PR-$ et $MS-$). Cela signifie que dans le contexte risqué, le planning a peu de chance de respecter la satisfaction du client et en plus de nombreux clients risquent de ne pas être satisfaits.

5.3.2 Négociation avec le client

L'objectif de cette section est de présenter comment le planificateur peut utiliser ces indicateurs dans la négociation avec son client. Il est important que le planificateur engage une négociation uniquement dans les cas les plus pertinents afin d'éviter des négociations de délai trop fréquentes ou trop importantes en délai pour un gain minime voire nul.

La négociation avec le client peut faire évoluer les valeurs des indicateurs de robustesse proposés. Le but est de passer d'une zone non acceptable $MS-$ ou $PR-$ à une zone acceptable ($MS+$, $PR+$), et par la suite à une situation robuste où la probabilité de respect du planning et le minimum de satisfaction sont égaux à 100%. Pour éviter les répétitions, l'indicateur $SProbRespect_{ds}(x)$ servira d'exemple. Dans cette section, le raisonnement à appliquer est le même pour tous les indicateurs.

L'objectif de cette section n'est pas de modifier le planning mais de négocier avec le client de manière à ce qu'un retard soit autorisé sur la livraison.

Le passage d'une solution acceptable à une solution robuste

Pour le passage d'une situation acceptable $PR+$ à une situation robuste, l'indicateur peut évoluer de deux manières : soit l'évolution est rapide, soit l'évolution est lente. Pour l'indicateur $SProbRespect_{ds}(x)$ les situations concernées sont les situations 1 et 2, pour l'indicateur $SMinSat_{ds}(x)$ les situations concernées sont les situations 1 et 3.

Pour une évolution rapide de l'indicateur $SProbRespect_{ds}(x)$ (5.5), toute minute négociée avec le client va augmenter de manière non négligeable la probabilité de respect du planning. Une livraison initialement refusée pour quelques minutes de retard peut finalement être acceptée si le planificateur a réussi à négocier avec le client. Pour l'évolution rapide, on suppose que le délai à négocier avec le client est faible.

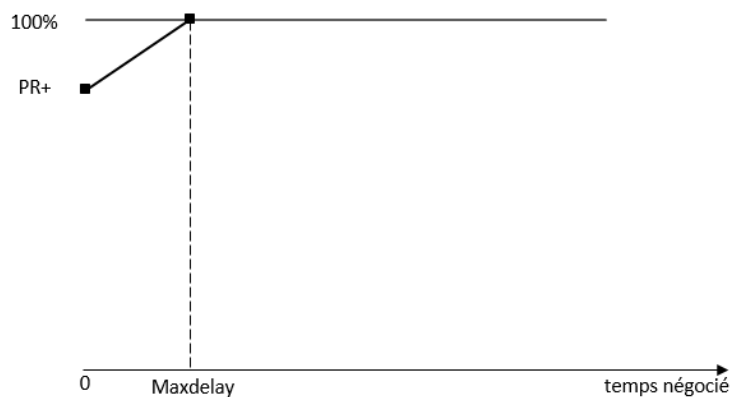


Figure 5.5 – Évolution rapide de l'indicateur $PR+$

Au contraire, pour une évolution lente (5.6), le délai à négocier est plus élevé. La négociation avec le client d'un temps égal à $SMaxDelay_{ds}$ permet d'obtenir la situation robuste. Une négociation d'un temps inférieur à $SMaxDelay_{ds}$ ne présente pas de changement significatif par rapport à la valeur de l'indicateur $SProbRespect_{ds}(0)$ avant négociation.

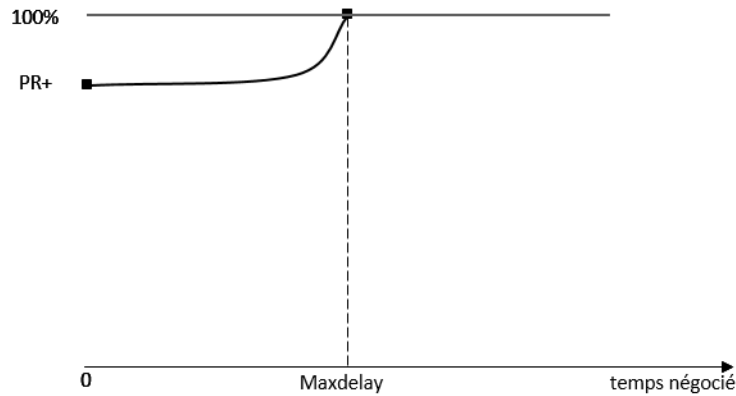


Figure 5.6 – Évolution lente de l'indicateur $PR+$

Le passage d'une solution non acceptable à une solution acceptable

Nous poserons α comme le seuil de temps à négocier pour passer d'une zone non acceptable à une zone acceptable. Nous allons ici nous intéresser aux plannings présents dans une zone non acceptable.

L'évolution rapide signifie que le temps α à négocier avec le client est faible pour passer d'une solution dans la zone non acceptable ($PR-$) à une solution dans la zone acceptable ($PR+$) pour l'indicateur de probabilité de respect du planning. La représentation de cette situation est illustrée figure 5.7.

Pour l'évolution lente, représentée figure 5.8, le temps α à négocier serait plus important si l'on souhaite obtenir une probabilité de respect acceptable.

Les différentes évolutions propices à la négociation

En appliquant la combinatoire des différents scénarios présentés, six cas d'évolutions sont possibles pour les 4 situations présentées sur la figure 5.4. Les cas 1 et 2 sont déjà illustrés figures 5.5 et 5.6 et représentent l'évolution que peut avoir l'indicateur de probabilité de respect du planning dans les situations 1 et 2 quand la probabilité de respect est considérée comme acceptable ($PR+$).

Le cas 1 présente une évolution rapide de l'indicateur de robustesse. Ceci montre que toute minute négociée avec le client est un moyen de perfectionner son planning journalier. Pour le cas 2, l'évolution est lente, une négociation inférieure à $SMaxDelay_{ds}$ ne modifie pas significativement la valeur de l'indicateur de robustesse.

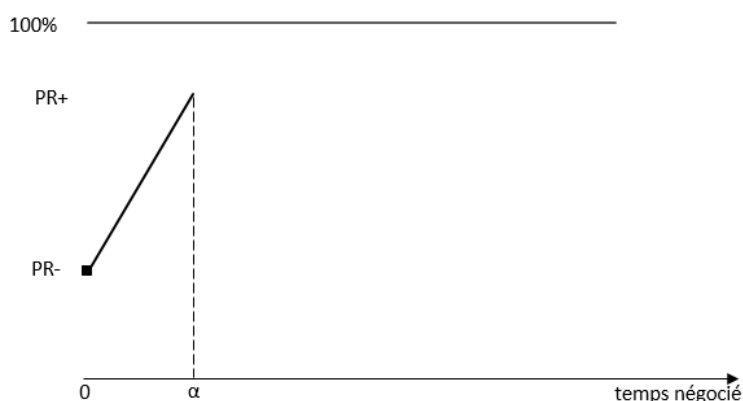


Figure 5.7 – Évolution rapide de l'indicateur $PR-$

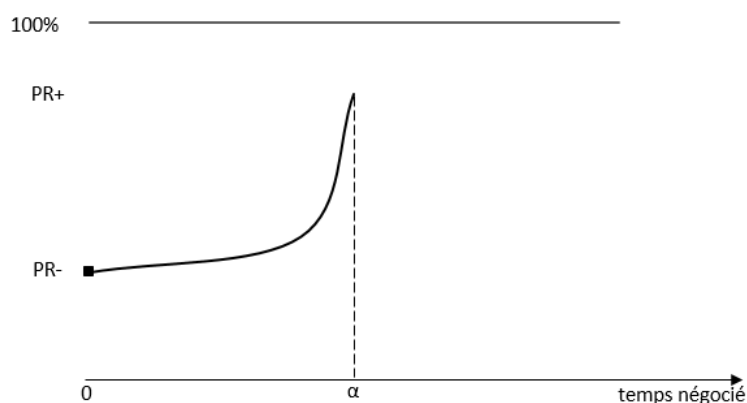


Figure 5.8 – Évolution lente de l'indicateur $PR-$

Les autres cas correspondent à la combinatoire du passage de la zone $PR-$ à la zone $PR+$ et du passage de la zone $PR+$ à la probabilité de respect du planning égale à 100%.

Le cas 3 (figure 5.9) est une évolution rapide. C'est-à-dire que pour passer de la zone $PR-$ à la zone $PR+$ le temps α à négocier est faible. Pour passer de la zone $PR+$ à une probabilité de respect du planning égale à 100% le temps est également faible. L'évolution de l'indicateur montre ici que toute minute négociée avec le client permet d'améliorer la probabilité de respect du planning.

Le cas 4 (figure 5.10) est une évolution rapide de l'indicateur pour passer de la zone non acceptable $PR-$ à la zone acceptable $PR+$. Le délai à négocier pour être dans cette nouvelle zone est α . La durée de négociation α est faible. Une fois dans la zone $PR+$, l'évolution de l'indicateur de robustesse est lente. Entre la durée α et $Maxdelay$, l'indicateur ne montre pas une forte évolution. Ceci diminue l'intérêt de la négociation. Seule la négociation de temps d'une durée de $Maxdelay$ permet d'améliorer significativement l'indicateur de robustesse.

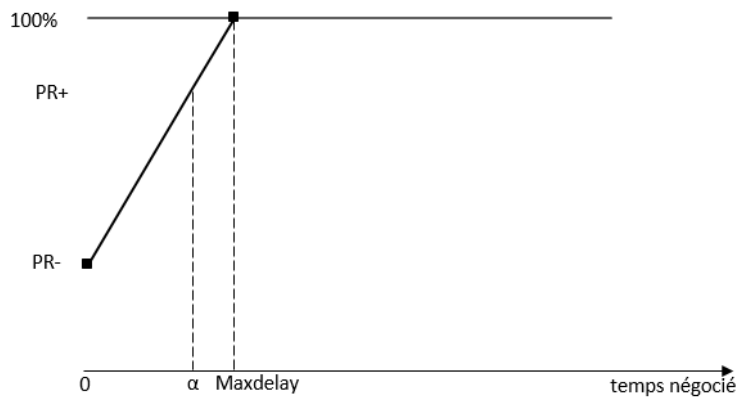


Figure 5.9 – Représentation du cas 3

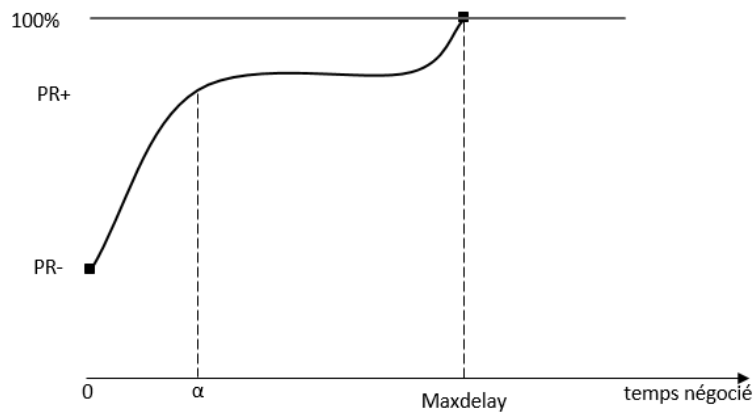


Figure 5.10 – Représentation du cas 4

Le cas 5 (figure 5.11) est une évolution lente de l'indicateur jusqu'à la zone acceptable $PR+$. Pour une négociation inférieure à α , l'évolution de l'indicateur montre peu d'intérêt car le temps à négocier est long pour des résultats peu satisfaisants. Une fois ce seuil atteint, l'évolution de l'indicateur est rapide. A ce moment-là, la négociation a du sens car toute minute négociée améliore l'indicateur de robustesse.

Le cas 6 (figure 5.12) est une évolution lente de l'indicateur de robustesse jusqu'à la zone acceptable $PR+$ suivie d'une seconde évolution lente jusqu'à la probabilité de respect égale à 100%. Ici, les négociations sont très ponctuelles. La négociation d'une durée inférieure à α ne modifie pas spécialement l'indicateur de robustesse. La négociation d'une durée comprise entre α et $Maxdelay$ n'améliore pas la valeur de l'indicateur de robustesse par rapport à une négociation d'une durée de α minutes. Les négociations importantes sont α et $Maxdelay$ car c'est uniquement à ces deux valeurs que l'indicateur montre un réel changement.

La table 5.4 présente les plages de temps où la négociation a un effet significatif sur les valeurs de l'indicateur de robustesse. La première colonne correspond aux 6

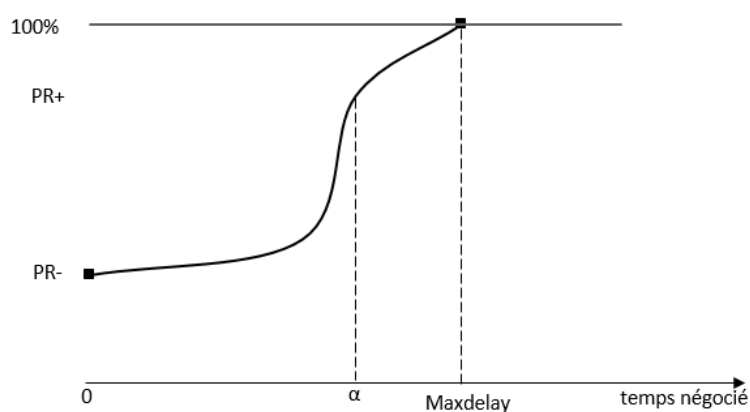


Figure 5.11 – Représentation du cas 5

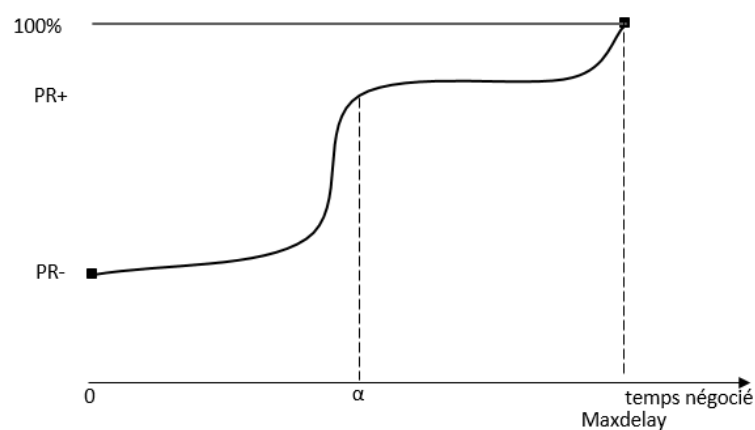


Figure 5.12 – Représentation du cas 6

cas précédemment présentés. Les autres colonnes présentent les différentes plages de temps de négociation (N) entre 0 et $Maxdelay$. La présence des « oui » dans le tableau signifie que la négociation est intéressante vis-à-vis des cas présentés. La présence des « - » signifie que la négociation n'a pas d'apport significatif sur l'indicateur de robustesse. La négociation de la valeur $Maxdelay$ permet toujours d'obtenir un indicateur de robustesse égale à 100%. Les négociations sont intéressantes lorsque le temps à négocier est faible par rapport à l'amélioration de l'indicateur.

Les 6 cas présentés schématisent les différentes évolutions possibles. Cependant, l'évolution des indicateurs est rarement aussi simple. Il faut noter la présence de palier où la négociation n'a aucun effet sur l'indicateur et la présence d'évolution rapide où la négociation peut améliorer de façon significative l'indicateur observé.

Table 5.4 – Négociation en fonction des différents cas observés

	$0 \leq N \leq \alpha$	α	$\alpha \leq N \leq Maxdelay$	$Maxdelay$
Cas1	oui	oui	oui	oui
Cas2	-	-	-	oui
Cas3	oui	oui	oui	oui
Cas4	oui	oui	-	oui
Cas5	-	oui	oui	oui
Cas6	-	oui	-	oui

Conclusion

Ce chapitre présente des éléments de réponse à la question de recherche suivante : « Quels indicateurs permettent de caractériser la capacité d'un planning à résister aux perturbations ? »

Pour permettre de donner une vision de la robustesse au niveau d'une tournée et d'un planning journalier, notre proposition est caractérisée par trois indicateurs de robustesse :

- L'indicateur *Maxdelay* permet de définir le temps maximum de retard sur l'ensemble des livraisons. Cette valeur est le temps à négocier pour qu'un planning s'effectue avec toutes les livraisons satisfaites.
- L'indicateur de robustesse *ProbRespect* définit la probabilité qu'un planning respecte la satisfaction des clients malgré les perturbations.
- L'indicateur *MinSat* permet de définir le minimum de satisfaction quel que soit le scénario de risques qui est réalisé.

Ces indicateurs de robustesse donnent une compréhension des différents scénarios de risques possibles pour un planning. Ils exposent la robustesse du planning pour montrer les évolutions d'un planning dans un contexte risqué. Ce chapitre présente une évaluation de l'utilisation de ces indicateurs de robustesse sur quatre situations. Pour permettre au planificateur de justifier le délai à négocier avec le client, la représentation de six cas d'évolution possibles illustrent les évolutions de ces quatre situations. Dans le cas où la négociation n'est pas totale, ces indicateurs peuvent lui permettre de choisir un planning en essayant de maximiser l'indicateur de probabilité de respect des livraisons et l'indicateur de minimum de satisfaction.

Lors de la phase de négociation, le planificateur doit négocier un temps de retard. Cependant, le temps à négocier peut être différent en fonction des clients. Une limite des indicateurs de robustesse proposés est qu'ils sont globaux donc ils ne permettent pas une représentation par client. Le chapitre suivant vise à illustrer les indicateurs de robustesse proposés sur un exemple extrait du monde industriel.

Chapitre 6

Cas d'application : planification d'une livraison dernier kilomètre

Introduction

L'objectif de ce chapitre est d'illustrer les contributions des chapitres 4 et 5. Pour valider l'utilisation de notre proposition, un cas d'étude construit sur la base des données issues d'un partenaire industriel, participant au projet SMART PLANNING, est présenté.

Les données de ce cas correspondent à la planification d'une demi-journée d'une entreprise du transport routier de marchandises. La thèse étant réalisée dans le projet SMART PLANNING, ce chapitre illustre les différentes étapes du processus de planification retenues dans ce projet. Les différentes étapes sont la génération de planning journalier, l'évaluation des plannings selon trois indicateurs (économique, environnemental et santé sécurité au travail), la sélection des plannings par le planificateur, l'évaluation de la robustesse. Les premières étapes sont présentées succinctement dans l'objectif d'éclairer le lecteur sur les mécanismes permettant d'obtenir des plannings journaliers. Les contributions de ce mémoire portant sur les mécanismes d'évaluation de la robustesse des plannings, c'est cette étape qui sera détaillée dans ce chapitre.

Afin d'évaluer la robustesse, il est nécessaire d'alimenter un portefeuille de dangers. Ce portefeuille de dangers va permettre d'implémenter les risques sur les différents plannings comme vu au chapitre 4. Une fois les risques présents sur chaque planning, il devient possible d'estimer les valeurs des indicateurs de robustesse des tournées pour chaque planning.

Ces indicateurs de robustesse permettent d'aider le planificateur à choisir un planning dans un contexte risqué. Comme vu au chapitre 5, les indicateurs vont permettre au planificateur de négocier un temps de retard avec le client pour améliorer la robustesse de son planning. Nous proposons alors d'observer les améliorations des indicateurs de la situation initiale sans négociation par rapport à une négociation de 5 ou 10 minutes de retard. L'ensemble de la méthodologie est intégrée dans le prototype du projet SMART PLANNING.

La section 6.1 présente le projet SMART PLANNING et le prototype RIO-Suite dans lequel ces contributions ont été implémentées. La section 6.2 présente les données nécessaires pour l'obtention des indicateurs de robustesse. Les données de l'entreprise (conducteurs, véhicules, clients, sites, commandes) permettent la génération des plannings journaliers. Pour modéliser le contexte risqué, trois dangers constitueront le portefeuille de dangers. La section 6.3 illustre l'évaluation des indicateurs (économique, environnemental et santé sécurité au travail) sur un planning. Nous avons choisi de sélectionner un nombre restreint de plannings correspondant aux attentes du planificateur sur ces trois premiers critères. A partir des plannings sélectionnés, l'évaluation de la robustesse est proposée. Nous illustrerons le calcul détaillé des indicateurs de robustesse sur un exemple de planning journalier tant au niveau tournée que planning. Pour les autres plannings journaliers, les valeurs des indicateurs de robustesse seront données pour le seul niveau du planning. La section 6.4 présente la partie analyse des indicateurs de robustesse. Cette partie a pour objectif de montrer l'évolution des indicateurs de robustesse après négociation du retard autorisé par le client. Les valeurs des indicateurs sans négociation, puis avec 5 et 10 minutes sont présentées. Les courbes des indicateurs de robustesse de chaque planning illustreront les situations présentées dans le chapitre 5.

6.1 Implémentation des contributions

Cette section présente l'environnement dans lequel les contributions ont été effectuées. Le projet SMART PLANNING financé par l'ANR (ANR-16-CE26-0017) a été le support de l'ensemble de ces travaux. Le projet, associé au domaine du transport routier de marchandises, a permis de regrouper des acteurs de différentes spécialités pour construire de nouveaux corpus de connaissances. Nous présentons ci-dessous de manière plus détaillée les différents acteurs qui ont participé à ce projet.

Les contributions que nous avons formulées ont été implémentées dans le prototype RIO-Suite qui est une suite logicielle développée au sein du laboratoire.

6.1.1 Le projet SMART PLANNING

Le projet SMART PLANNING est un projet de recherche, financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR). Il vise à élaborer un module logiciel pour aider le planificateur à choisir un planning en situation complexe et risquée. Ce module prend en compte, dans la construction et l'évaluation de tournées, les nombreux critères économiques, environnementaux, sanitaires, sécuritaires, les contraintes réglementaires et les risques rencontrés lors de la réalisation des tournées. Le projet SMART PLANNING réunit des laboratoires de recherche et des industriels. L'INRS (Institut national de recherche et de sécurité) Nancy est chargé du recueil des données terrain ainsi que de la mise en place d'un indicateur SST (santé et sécurité au travail) pour l'évaluation des tournées et des plannings. L'INUC (Institut national universitaire Jean-François-Champollion) Albi est chargé de l'implémentation de l'interface du prototype de manière à proposer l'ensemble des indicateurs et solutions proposés au planificateur. Le CGI (Centre de Génie Industriel) IMT Mines-Albi est

chargé de la génération des solutions avec le respect des contraintes et de l'évaluation des indicateurs de robustesse sur les tournées et plannings journaliers. Les entreprises Deret et Main Forte sont des entreprises du transport routier de marchandises. Elles ont apporté l'expertise du métier de la planification des tournées, fourni les données terrain et permis de valider les différentes propositions et de simuler des expériences à partir de données réelles.

6.1.2 Le prototype RIO-Suite

Le prototype RIO-Suite¹ est un logiciel open source hébergé au centre de Génie Industriel de l'IMT Mines Albi. Il est issu des prototypes IO-Suite (Benaben et al., 2017) et Pro-(R)isk (Marmier et al., 2014; Nguyen et al., 2013). Ce logiciel est dédié à supporter à la fois l'(I)nteropérabilité au sein de collaborations d'(O)rganisations et la gestion des (R)isques. RIO-Suite est le support de nombreux projets présents au sein du laboratoire et adresse de nombreux domaines comme ceux de la gestion de crise, de la santé, de la supply-chain...

Le modèle de données présenté au chapitre 3 est hérité du métamodèle de RIO-Suite présenté par Benaben et al. (2017). Pour implémenter mes contributions à ce logiciel, des propositions d'évolution ont été faites et implémentées au sein du prototype. Les principaux apports sont la description plus fine des attributs du concept danger, auparavant implémenté par Fertier (2018), la génération et l'évaluation des risques sur un processus à partir du concept de danger et l'évaluation de la robustesse lors des simulations des scénarios de risques.

L'ensemble du cas d'étude est réalisé sur le prototype RIO-Suite. Les données de la planification (entreprise du transport, conducteur, véhicule, client, site et commande) et les dangers sont renseignés pour réaliser la génération des plannings puis l'évaluation de la robustesse.

6.2 Les données manipulées par le planificateur

L'objectif de cette section est de présenter les données manipulées permettant une fois le planning construit d'évaluer la robustesse. L'ensemble des données manipulées respectent le modèle de données présenté au chapitre 3. Ce modèle de données est la structure permettant de décrire l'ensemble des concepts manipulés par le planificateur. Les conducteurs, véhicules, clients, sites et commandes sont décrits pour nous permettre de proposer un algorithme de génération de plannings journaliers. Ces plannings sont confrontés à un contexte risqué. Pour illustrer notre proposition du chapitre 4, trois dangers constitueront le contexte dans lequel les plannings sont réalisés.

1. <https://research-gi.mines-albi.fr/display/RIOSUITE/Welcome>

Table 6.1 – Liste des commandes

Id. Commande	Site de livraison	Heure de livraison	Quantité (palettes)
Order 1	Site 1	7h15	3
Order 2	Site 2	7h00	2
Order 3	Site 3	8h00	3
Order 4	Site 4	7h15	3
Order 5	Site 5	5h30	2
Order 6	Site 6	8h15	3
Order 7	Site 7	7h30	2
Order 8	Site 8	7h15	2
Order 9	Site 9	6h30	3
Order 10	Site 10	6h00	3
Order 11	Site 11	6h00	2
Order 12	Site 12	7h00	3
Order 13	Site 13	6h30	2
Order 14	Site 14	7h30	3
Order 15	Site 15	5h00	3
Order 16	Site 16	6h45	3
Order 17	Site 17	6h45	3
Order 18	Site 18	8h30	2
Order 19	Site 19	5h00	2
Order 20	Site 20	6h45	2
Order 21	Site 21	7h30	2
Order 22	Site 22	7h30	2
Order 23	Site 23	8h00	3
Order 24	Site 24	7h30	2
Order 25	Site 25	6h30	2

6.2.1 Les données de planification

Le cas d'étude présenté correspond à la planification d'une demi-journée d'une entreprise réelle. Toutes les données sont anonymisées pour des raisons de confidentialité.

Le planificateur doit planifier 25 commandes. Ces 25 commandes sont décrites par l'ensemble des attributs présentés dans le chapitre 3. La table 6.1 est une illustration succincte de la description des commandes. Une commande va être décrite par le site de livraison, l'heure de livraison, le nombre de palettes... Dans notre exemple, l'heure de livraison est une heure fixe pour l'ensemble des commandes.

Les 25 sites à livrer sont également décrits selon le modèle de données présenté au chapitre 3. La figure 6.1 présente la répartition géographique des sites à livrer. Les sites sont caractérisés par des heures d'ouverture et de fermeture. Aucun site n'a de quai de déchargement et tous les sites appartiennent au même client. La restriction à un client n'impacte pas la proposition des indicateurs de robustesse car ces indicateurs sont basés sur une vision globale de la tournée et du planning

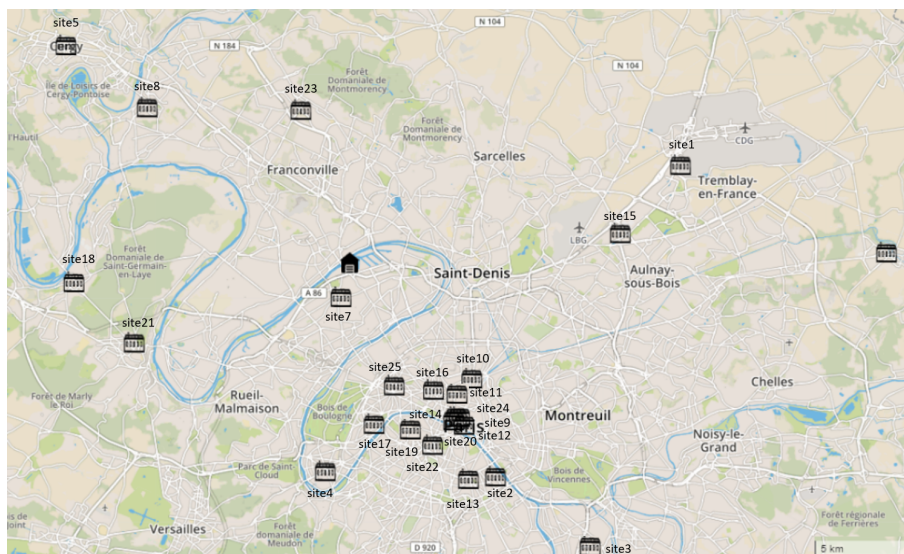


Figure 6.1 – Positionnement géographique des sites à livrer

journalier. La partie négociation avec le client n'est pas impactée non plus par cette restriction car elle s'effectue sur les indicateurs de robustesse.

Pour les données de l'entreprise de transport, nous utilisons un entrepôt qui possède 15 véhicules et 15 conducteurs. L'ensemble de la description de ces concepts n'impactent pas l'évaluation de la robustesse. Les attributs du véhicule et du conducteur permettent de générer des contraintes lors de la planification et permettent d'évaluer les attributs agrégés des tournées et des plannings journalier.

L'ensemble des données du client et de l'entreprise de transport sont nécessaires pour effectuer la planification.

6.2.2 La génération des plannings journaliers

L'objectif de cette étape est de construire plusieurs plannings journaliers respectant les exigences client pour réaliser l'ensemble des commandes. A partir de cette liste de plannings possibles, le planificateur pourra comparer ces solutions pour en sélectionner une.

Au sein du projet SMART PLANNING, nous avons proposé un algorithme qui est capable de générer de nombreuses solutions. Cet algorithme est un algorithme de placement au plus tôt. Il ne cherche pas à optimiser car même si un planning est évalué sur trois critères dans notre prototype (économique, environnemental et santé sécurité au travail), le contexte risqué peut perturber les plannings et donc les indicateurs associés. Pour réaliser un placement au plus tôt, les listes de commandes, de véhicules et de conducteurs doivent être ordonnées. L'objectif de ces listes est d'identifier, pour chacun de ces concepts, quel est l'individu le plus contraint. Par exemple, concernant le concept commande, la commande se trouvant en première position de la liste est la commande qui a une contrainte horaire la plus élevée. Une livraison dont la contrainte horaire est 8h est plus contraignante qu'une livraison

dont la contrainte horaire est entre 8h et 12h. Ainsi, la commande la plus contrainte sera affectée en premier.

Un travail mené par l'INRS avec les planificateurs des entreprises partenaires a permis d'identifier les critères à retenir pour chacun des concepts afin d'établir les classements. Dans un premier temps, notre choix est de représenter le raisonnement du planificateur. Pour cela, la méthode multicritère AHP (analyse multicritère hiérarchique) (Saaty, 1995) nous a permis de pondérer l'ensemble des attributs de nos trois concepts (commande, véhicule et conducteur) pour connaître les critères pris en compte en premier par le planificateur lors de la création d'un planning.

La construction de cette pondération a été effectuée par des experts du transport routier de marchandises. En utilisant la méthode AHP, nous avons demandé aux experts de répartir un nombre To de jetons sur les attributs de chaque concept (commande, véhicule et conducteur) pour identifier l'attribut le plus important pour la planification. Par la suite, les experts ont comparé les attributs deux à deux. Pour cela, il a été demandé de noter sur une échelle de 1 à 9 l'importance d'un attribut par rapport à un autre, 1 signifie que les deux attributs sont pris en compte de manière égale et 9 signifie que le premier attribut est beaucoup plus important que le second dans la pondération. A partir de l'ensemble des comparaisons deux à deux, la méthode permet d'obtenir un poids précis de chaque attribut.

A partir des poids obtenus par la méthode AHP et des données d'entrée, nous utilisons une deuxième méthode multicritère Promethee (Brans et al., 1985) pour classer par ordre de préférence les données manipulées. Les fonctions de préférence de la méthode ont pour objectif de définir les seuils à partir desquels un attribut est déterminant pour la comparaison. Par exemple, pour l'attribut quantité de palettes qu'un véhicule peut transporter, l'expert doit déterminer à partir de combien de palettes d'écart un véhicule est préféré à un autre. Une fois cette méthode utilisée, nous obtenons une liste pour chaque concept où l'ensemble des éléments est ordonné et pondéré.

Notre objectif est de créer des listes ordonnées de commandes, de véhicules et de conducteurs pour utiliser l'algorithme de placement. La combinatoire de ces trois listes dans l'algorithme de placement permet d'obtenir une première solution (un planning journalier complet). Notre objectif est de permettre au planificateur de comparer plusieurs solutions. Pour construire plusieurs solutions, notre choix s'est porté sur un mécanisme d'exploration des solutions proches du raisonnement humain, tel que présenté précédemment.

Pour chaque concept, nous avons une liste d'éléments ordonnés selon un poids, obtenu par les approches multicritères présentées ci-dessus. Pour créer une nouvelle liste dans chaque concept, contenant la même liste d'éléments mais ordonnés de manière différente, nous effectuons un tirage aléatoire pondéré par les poids de chaque élément. Une fois le tirage aléatoire pondéré effectué, nous obtenons une nouvelle liste pour chaque concept, et l'utilisation de l'algorithme de placement tel que présenté ci-dessus génère une nouvelle solution. L'ensemble de ces travaux sur la génération de planning à l'aide des méthodes multicritères est soumis dans « Journal of Decision Systems ».

Table 6.2 – Description des dangers

Id	Nom du danger	Tâche impactée	Localisation
d1	Circulation intense route 1	Move	Route 1
d2	Absence du client 13	Act. Site	Site 13
d3	Circulation intense route 10	Move	Route 10

Dans le cas d'étude présent, cette méthode de génération de plannings est appliquée. Afin de respecter la contrainte de temps du planificateur pour créer un planning, 56 plannings journaliers d'environ une quinzaine de tournées chacun ont été générés en 5 minutes pour notre cas d'étude.

6.2.3 Les dangers pris en compte

Pour représenter le contexte risqué, les experts du transport routier de marchandises ont identifié trois dangers pouvant impacter le planning de la journée étudiée.

Ces dangers sont décrits dans la table 6.2. La route 1 correspond à l'axe entre le site 1 et le site 6. La route 10 est l'axe permettant de quitter le site 10 en raison d'une rue à sens unique.

Chaque danger est également caractérisé par des fenêtres temporelles (plages journalières et plages horaires) (voir table 6.3) pour permettre de préciser les probabilités et impacts des risques associés en fonction des heures de réalisation des activités des tournées. Comme l'ensemble des plannings est réalisé la même journée, les plages journalières ne sont pas représentées. Les plages horaires se trouvent en haut de la table. Par exemple, la probabilité d'avoir une circulation élevée sur la route 1 est plus importante entre 5h et 10h (40%) qu'entre 0h et 5h (5%). De manière similaire, l'impact de cette perturbation sur une activité motrice (qui est une activité de type "Move") est concerné par ce danger, l'utilisation de cette route est plus importante entre 10h et 16h (+15 minutes) qu'entre 21h et 24h (+5 minutes). Les valeurs détaillées sont présentées dans la table 6.3.

Table 6.3 – Caractérisation de la probabilité et de l'impact des dangers

Id	Probabilité					Impact				
	[0h-5h]	[5h-10h]	[10h-16h]	[16h-21h]	[21h-24h]	[0h-5h]	[5h-10h]	[10h-16h]	[16h-21h]	[21h-24h]
d1	0.05	0.4	0.25	0.4	0.05	+1 min	+10 min	+15 min	+10 min	+5 min
d2	0.05	0.5	0.3	0.4	0	+5 min	+10 min	+15 min	+10 min	+2 min
d3	0.1	0.3	0.3	0.4	0	+1 min	+15 min	+10 min	+10 min	+2 min

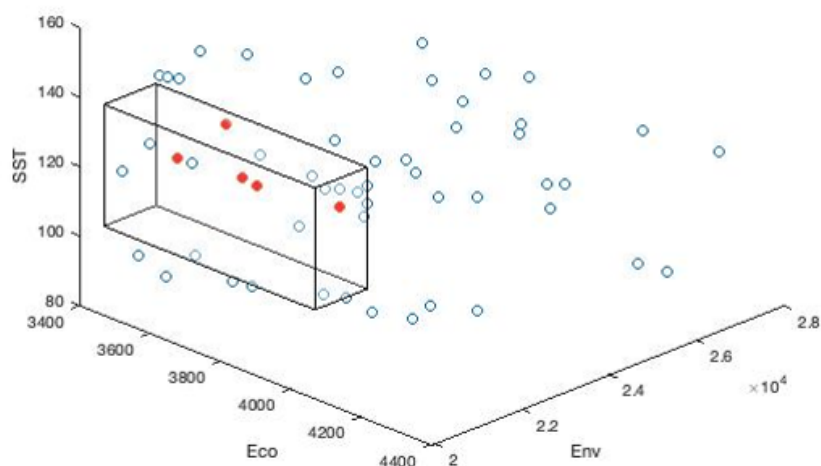


Figure 6.2 – Représentation des évaluations des 56 plannings journaliers

6.3 Évaluation des plannings journaliers

Une fois les plannings journaliers générés et les dangers caractérisés, le planificateur doit sélectionner le planning qui lui semble répondre au mieux à ses attentes. Les travaux menés au sein du projet SMART PLANNING avec les différents partenaires ont permis de proposer trois indicateurs (économique, environnemental et santé sécurité au travail) permettant d'évaluer les plannings. Tous les plannings générés respectent les contraintes des clients (contraintes horaires, contraintes de sécurité...). Par conséquent, cela veut dire que les indicateurs proposés permettent au planificateur de s'intéresser à la sélection d'un planning respectant au mieux les objectifs et contraintes de l'entreprise de transport. Après avoir sélectionné un nombre de plannings restreint, le planificateur peut évaluer la robustesse de chaque planning sur ces derniers.

6.3.1 Évaluation des indicateurs (Eco, Env et SST)

Pour ce cas d'étude, 56 plannings sont générés, intitulés *ds1* à *ds56*. Chaque planning est composé d'un ensemble de tournées permettant de satisfaire les différentes contraintes notamment l'heure de livraison exigée par le client. Ces plannings journaliers sont ensuite évalués en fonction des trois indicateurs financier, environnemental et santé à l'étape suivante. Les résultats sont présentés à la figure 6.2. Chaque point correspond à un planning. Chaque axe matérialise les valeurs d'un des trois indicateurs (Eco, Env et SST).

Le planificateur procède à une première comparaison afin de sélectionner un nombre moins élevé de plannings. Il peut exclure les plannings qui n'atteignent pas ses

Table 6.4 – Évaluation des plannings

Daily schedule	Eco.(€)	Env.(gCO2)	SST
ds27	3 601	21 684	131
ds32	3 961	21 397	123
ds34	3 702	21 558	119
ds46	3 589	20 655	126
ds48	3 712	21 145	123

objectifs financiers en utilisant un seuil. Dans cet exemple, le planificateur a fixé le seuil financier à 4 000 €. De même, il a mis un seuil sur les indicateurs environnemental et santé afin de ne conserver que les plannings qui lui semblent satisfaire ses objectifs. L'indicateur d'environnement se situe entre 20 500 et 21 700 grammes de dioxyde de carbone et pour l'indicateur de santé et de sécurité au travail, il se situe entre 100 et 135 de coût physique pour cet exemple.

Suite à cette analyse, seuls 5 plannings journaliers sont conservés pour l'étude de la robustesse (*ds27*, *ds32*, *ds34*, *ds46*, *ds48*). L'évaluation de ces plannings est présentée dans la table 6.4.

6.3.2 Illustration des indicateurs de robustesse au niveau des tournées

Maintenant que la sélection selon les indicateurs (économique, environnemental et santé sécurité au travail) est faite, le planificateur peut s'intéresser à la robustesse des plannings. Chaque planning va être confronté à la base de données des dangers potentiels. Pour toute activité de chaque planning intersectant avec une des zones de danger identifiées alors un risque sera généré sur le planning. Pour illustrer les indicateurs de robustesse, nous présenterons le planning *ds27*, composé de 11 tournées. Les trois dangers (*d1*, *d2* et *d3*) du portefeuille de dangers ont généré des risques (R_1 , R_2 et R_3) sur le planning. Le risque R_1 a une incidence sur la tournée *t8*, le risque R_2 a un impact sur la tournée *t5* et le risque R_3 a un impact sur la tournée *t2*. La table 6.5 correspond aux valeurs de robustesse pour un retard accepté de 0 minute ($x=0$), c'est-à-dire sans aucune négociation.

Pour le même planning *ds27*, si le planificateur négocie un retard de 10 minutes avec le client, les valeurs des indicateurs sont modifiées. La table 6.6 correspond à la valeur de robustesse pour un retard accepté de 10 minutes ($x=10$). A l'aide de cette table, le constat est que les retards sur les tournées *t5* et *t8*, impactées par les risques R_1 et R_2 peuvent être absorbés par la négociation réalisée par le planificateur. Pour la tournée *t2* impactée par le risque R_3 , la valeur de minimum de satisfaction ($TMinSat(10)$) est plus importante, elle est passée de 0.84 à 0.96. La probabilité que la tournée respecte la satisfaction client a augmenté de 0.21 à 0.7 mais n'est pas encore parfaite (égale à 1).

Table 6.5 – Indicateur de robustesse (pour $x=0$) détaillé pour chaque tournée de *ds27*

	$TNbDel$	$TProbRespect(0)$	$TMinSat(0)$	$TMaxDelay(min)$
t1	3	1	1	0
t2	4	0.7	0.5	12.77
t3	2	1	1	0
t4	2	1	1	0
t5	3	0.5	0.5	1.8
t6	2	1	1	0
t7	2	1	1	0
t8	2	0.6	0.5	8.1
t9	1	1	1	0
t10	2	1	1	0
t11	2	1	1	0
	$SNbDel$	$SProbRespect(0)$	$SMinSat(0)$	$SMaxDelay(min)$
ds27	25	0.21	0.84	12.77

Table 6.6 – Indicateur de robustesse (pour $x=10$) détaillé pour chaque tournée de *ds27*

	$TNbDel$	$TProbRespect(10)$	$TMinSat(10)$	$TMaxDelay(min)$
t1	3	1	1	0
t2	4	0.7	0.75	12.77
t3	2	1	1	0
t4	2	1	1	0
t5	3	1	1	1.8
t6	2	1	1	0
t7	2	1	1	0
t8	2	1	1	8.1
t9	1	1	1	0
t10	2	1	1	0
t11	2	1	1	0
	$SNbDel$	$SProbRespect(10)$	$SMinSat(10)$	$SMaxDelay(min)$
ds27	25	0.7	0.96	12.77

Table 6.7 – Indicateur de robustesse avec $x=0$

Planning journalier	$SProbRespect(0)$	$SMinSat(0)$	$SMaxDelay(min)$
ds_{27}	0.21	0.84	12.77
ds_{32}	0.35	0.92	8.32
ds_{34}	0.21	0.88	8.32
ds_{46}	0.42	0.92	22.37
ds_{48}	0.42	0.92	12.77

6.3.3 Illustration des indicateurs de robustesse au niveau planning journalier

A partir de l'illustration du planning journalier ds_{27} , le même mécanisme est appliqué aux autres plannings. Chaque planning est confronté au portefeuille de dangers. Cela permet de générer les différents risques. Puis les différents scénarios de risques sont simulés pour obtenir les indicateurs de robustesse de chaque tournée. Suite à cela, avec les équations proposées dans le chapitre précédent, les indicateurs de robustesse sont calculés au niveau du planning journalier.

La table 6.7 présente les valeurs des indicateurs de robustesse pour chaque planning journalier avec une marge x égale à 0.

Les valeurs de l'indicateur ($SProbRespect(0)$) de la probabilité de respecter l'heure de livraison varient entre 21% et 42%. Cela montre que l'ensemble des plannings a peu de chance de respecter l'ensemble des engagements de livraison. Cependant, le minimum de satisfaction ($SMinSat(0)$) est situé entre 84% et 92%, ce qui montre que peu de livraisons sont impactées. Le retard maximum ($SMaxDelay$) est compris entre 8.32 minutes et 22.37 minutes.

6.4 Interprétation des indicateurs de robustesse

Les valeurs obtenues dans l'évaluation des plannings ont pour objectif de permettre au planificateur de choisir le planning le plus adapté au contexte actuel. Cependant, la robustesse des plannings n'est pas forcément celle attendue. Pour correspondre aux attentes du planificateur, une négociation avec le client s'impose.

Nous proposons ci-dessous une démarche structurée pour l'interprétation des indicateurs de robustesse proposés. Notre proposition est de présenter les indicateurs de robustesse sans négociation et de les confronter à ce que l'on obtiendrait en tolérant un retard de 5 et 10 minutes.

6.4.1 Comparaison des plannings sans négociation

La comparaison des plannings journaliers sans négociation correspond à la table 6.7 de la section précédente. Le planificateur va faire une observation des trois indicateurs

de robustesse en commençant par la probabilité de respect, puis le minimum de satisfaction et ensuite le retard maximum.

Dans un premier temps, le planificateur va chercher les plannings ayant la plus grande probabilité de respect $SProbRespect(0)$. Car une livraison en retard peut être refusée et donc va impacter la satisfaction client mais également les indicateurs du planificateur. De plus, le refus d'une livraison pour cause de retard entraîne une nouvelle livraison le lendemain, cela va donc engendrer des modifications sur les plannings des jours suivants. Dans notre cas d'étude, le planificateur va s'orienter vers les plannings $ds46$ et $ds48$ ayant une probabilité de respect la plus élevée.

Dans un deuxième temps, le planificateur va s'intéresser au minimum de satisfaction $SMinSat(0)$. Le minimum de satisfaction correspond au pourcentage de client satisfait quels que soient les risques impactant la tournée. Un minimum de satisfaction élevé signifie que peu de livraisons sont impactées. Par conséquent, les indicateurs de départ (économique, environnemental et santé sécurité au travail) sont moins impactés. Le planificateur va donc s'orienter vers un minimum de satisfaction le plus élevé. Dans notre cas d'étude, les minimums de satisfactions des deux plannings $ds46$ et $ds48$ sont identiques.

Ensuite, le planificateur va s'intéresser au retard maximum $SMaxDelay$ car son objectif est également de limiter les retards sur les livraisons. Il va donc choisir le planning qui peut avoir le moins de retard, c'est-à-dire le planning journalier $ds48$.

Pour l'indicateur de la probabilité de respect $SProbRespect(0)$, le choix dans cet exemple est de conserver les plannings ayant la plus grande valeur. L'utilisation de seuil comme dans le chapitre 5 aurait pu être mise en place. Par exemple, le planificateur peut considérer que les plannings sont dans une zone acceptable si $SProbRespect(0)$ est supérieur ou égal à 35%. De la même manière pour l'indicateur du minimum de satisfaction $SMinSat(0)$, un seuil aurait pu être mis en place par le planificateur.

Cependant il est possible que les seuils voulus par le planificateur ne soient pas atteints par les plannings sélectionnés. Dans ce cas-là, le planificateur doit négocier un retard autorisé avec le client sur une livraison. Cela nous amène à nous intéresser aux évolutions des indicateurs de robustesse.

6.4.2 Courbes des indicateurs de robustesse des plannings sélectionnés

Pour permettre au planificateur de connaître le temps à négocier, il faut s'intéresser aux courbes des indicateurs $SProbRespect(x)$ et $SMinSat(x)$. Le planificateur cherche à respecter des seuils pour les deux indicateurs pour que le planning soit considéré comme acceptable pour lui. Pour notre cas d'étude, le seuil acceptable pour l'indicateur $SProbRespect(x)$ est de 70% et pour l'indicateur $SMinSat(x)$ le seuil est de 90%.

Une fois les seuils fixés, il faut regarder si, sans négociation, les plannings respectent les seuils. Puis, dans un deuxième temps, observer les courbes pour connaître le délai

à négocier pour qu'un planning soit entièrement acceptable par le planificateur. Pour rappel, comme vu dans le chapitre 5, les seuils des deux indicateurs permettent de structurer les plannings selon 4 situations. Les situations sont :

- les seuils sont respectés (situation 1) ;
- uniquement le seuil de la probabilité de respect des livraisons est respecté (situation 2) ;
- uniquement le seuil de la satisfaction minimum est respecté (situation 3) ;
- aucun seuil n'est respecté (situation 4).

A partir des indicateurs $SProbRespect(0)$ et $SMinSat(0)$, on remarque que les plannings ds_{27} et ds_{34} sont dans la situation 4 où aucun seuil n'est satisfait. Les plannings ds_{32} , ds_{46} et ds_{48} sont dans la situation 3 où seulement le minimum de satisfaction est dans la zone acceptable par le planificateur.

Maintenant que les plannings sont positionnés dans une situation, il faut connaître l'évolution des deux indicateurs pour pouvoir négocier avec le client. Pour rappel dans le chapitre 5, chaque indicateur peut évoluer de 6 façons différentes correspondant aux 6 cas présentés dans le chapitre précédent. Soit l'indicateur est dans une zone acceptable, alors on s'intéresse au passage de la zone acceptable à la valeur de robustesse de 100% pour l'indicateur :

- Cas 1 l'évolution est rapide ;
- Cas 2 l'évolution est lente.

Soit l'indicateur est dans une zone non acceptable, la première évolution est de la zone non acceptable à la zone acceptable et la deuxième évolution est de la zone acceptable à la robustesse de 100% :

- Cas 3 les deux évolutions sont rapides ;
- Cas 4 la première évolution est rapide et la deuxième est lente ;
- Cas 5 la première évolution est lente et la deuxième est rapide ;
- Cas 6 les deux évolutions sont lentes.

Pour chaque indicateur, un cas d'évolution est possible. Les cas d'évolution peuvent être différents pour les deux indicateurs d'un même planning. Les fonctions associées aux indicateurs $SProbRespect(x)$ et $SMinSat(x)$ des plannings (ds_{27} , ds_{32} , ds_{34} , ds_{46} et ds_{48}) sont présentées dans leurs colonnes respectives de la table 6.8. Ces fonctions permettent au planificateur de voir, en fonction du retard, qu'il peut négocier avec le client quelle serait la meilleure planification.

Pour chaque planning, il est possible de préciser dans quel cas d'évolution se trouve chacun de ces indicateurs de robustesse. Pour cela, il faut observer la tendance de la courbe pour atteindre le seuil acceptable de l'indicateur et la tendance pour atteindre une robustesse de 100%.

Pour le planning ds_{27} , le temps pour atteindre le seuil de l'indicateur de probabilité de respect $SProbRespect(X)$ est important tandis que le passage de ce seuil à la valeur de 100% est immédiate. L'indicateur $SProbRespect_{ds_{27}}(X)$ est dans le cas 5. Pour l'indicateur de minimum de satisfaction $SMinSat(X)$, le seuil de 90% est

Table 6.8 – Évaluation des plannings selon ProbRespect(X) et Minsat(X)

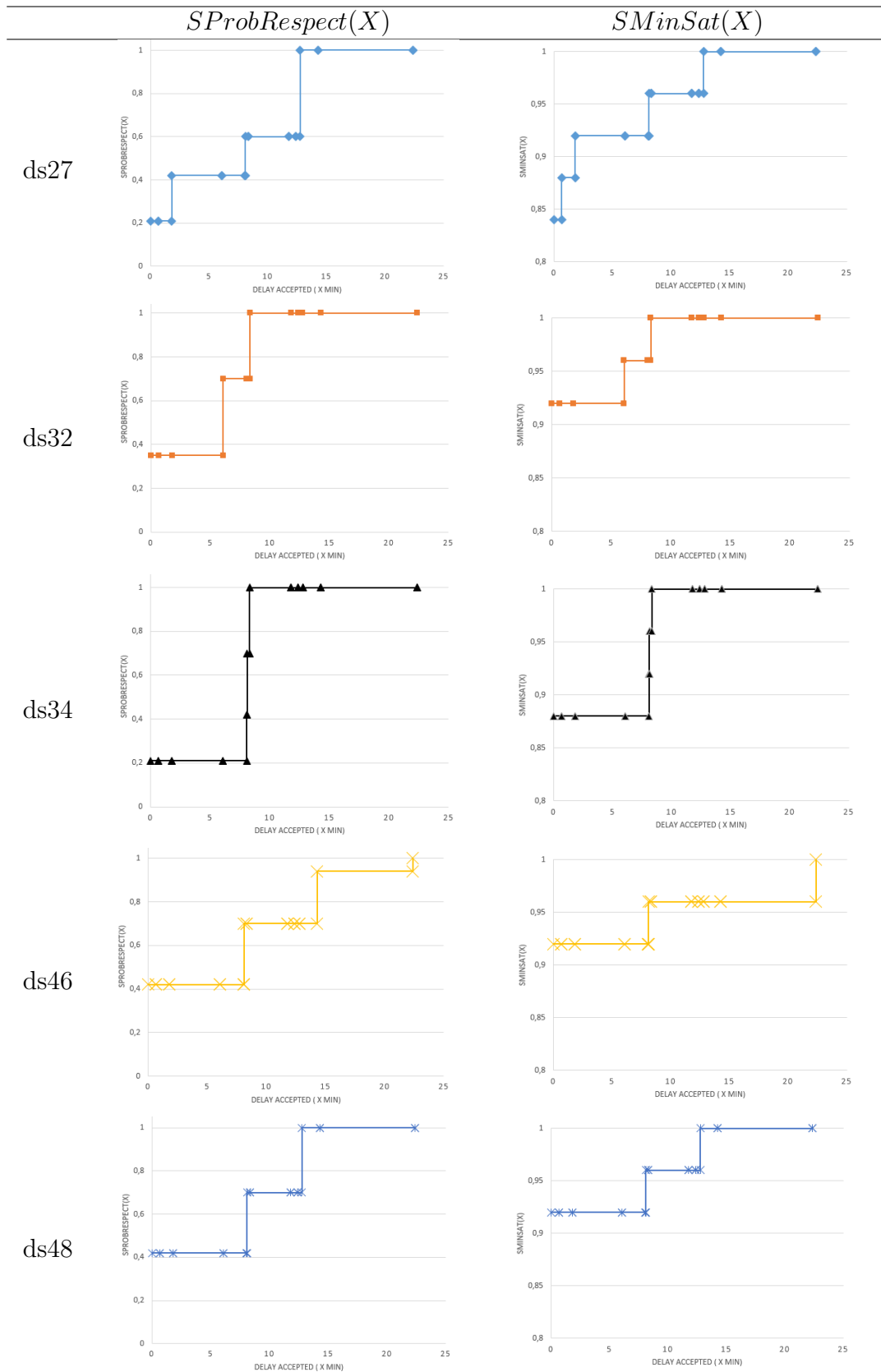


Table 6.9 – Indicateur de robustesse avec $x=5$

Daily Schedule	$SProbRespect(5)$	$SMinSat(5)$	$SMaxDelay(min)$
ds27	0.42	0.92	12.77
ds32	0.35	0.92	8.32
ds34	0.21	0.88	8.32
ds46	0.42	0.92	22.37
ds48	0.42	0.92	12.77

rapidement atteint mais pour atteindre la valeur de 100%, le temps à négocier est long. L'indicateur $SMinSat_{ds27}(X)$ est donc dans le cas 4.

Par une observation similaire des graphiques, il est possible de donner l'ensemble des cas d'évolutions des différents indicateurs :

- $SProbRespect_{ds32}(X)$: Cas 5 ;
- $SMinSat_{ds32}(X)$: Cas 2 ;
- $SProbRespect_{ds34}(X)$: Cas 5 ;
- $SMinSat_{ds34}(X)$: Cas 5 ;
- $SProbRespect_{ds46}(X)$: Cas 6 ;
- $SMinSat_{ds46}(X)$: Cas 2 ;
- $SProbRespect_{ds48}(X)$: Cas 5 ;
- $SMinSat_{ds48}(X)$: Cas 2.

Connaître l'évolution des indicateurs est un atout pour la sélection d'un planning lors de la négociation. Cela permet au planificateur de connaître le temps à négocier pour que les plannings journaliers soient satisfaisants par rapport au seuil qu'il s'est fixé. Cela amène à la phase de négociation avec le client.

6.4.3 Comparaison des plannings avec une négociation de 5 et 10 minutes

Dans cette section nous allons étudier deux négociations différentes, une de 5 minutes et une de 10 minutes pour le délai de livraison. Nous présenterons le planning respectant au mieux les attentes du planificateur pour chaque négociation. Dans un premier temps, nous avons vu que le planning sélectionné sans négociation était le planning ds_{48} car les indicateurs de robustesse sont les plus proches des attentes de celui-ci.

Pour une négociation de 5 minutes, les indicateurs de robustesse sont différents (voir table 6.9).

La négociation de 5 minutes présentée dans la table 6.9 montre que seules les valeurs du planning ds_{27} ont changé. La probabilité de respect est passée de 21% à 42% et le minimum de satisfaction est passé de 84% à 92%. L'augmentation de la probabilité de respect est importante mais le seuil acceptable n'est pas atteint. Pour l'indicateur

Table 6.10 – Indicateur de robustesse avec $x=10$

Daily Schedule	$SProbRespect(10)$	$SMinSat(10)$	$SMaxDelay(min)$
ds27	0.6	0.96	12.77
ds32	1	1	8.32
ds34	1	1	8.32
ds46	0.7	0.96	22.37
ds48	0.7	0.96	12.77

de minimum de satisfaction, le seuil est atteint avec un court temps de négociation comme nous avons pu le voir lors de la définition du cas d'évolution de l'indicateur du planning ds_{27} . Par rapport aux indicateurs de robustesse, le planificateur peut sélectionner les plannings ds_{27} et ds_{48} qui après avoir négocié 5 minutes avec le client sont équivalents.

Comme le présentent les différents cas d'évolution des indicateurs, le temps à négocier est long pour atteindre le seuil acceptable dans la majorité des plannings. Les cas 2, 5 et 6 sont des cas où l'évolution de l'indicateur est lente dans un premier temps. Nous allons donc nous intéresser à une négociation avec le client de 10 minutes.

La table 6.10 est la synthèse des résultats des indicateurs de robustesse avec une négociation de 10 minutes entre le planificateur et le client. Le constat est que deux plannings (ds_{32} et ds_{34}) ont des indicateurs de robustesse à 100%. Cela signifie que quels que soient les risques pris en compte perturbant le planning, l'ensemble des livraisons sera effectué avec un retard inférieur à 10 minutes. Ce retard étant négocié avec le client la livraison respectera les engagements. Les plannings ds_{46} et ds_{48} respectent les deux seuils qu'accepte le planificateur mais les plannings peuvent encore ne pas satisfaire l'ensemble des clients. Le planning ds_{27} ne respecte toujours pas le seuil de la probabilité de respect des livraisons.

Avec 10 minutes de négociation, les plannings ds_{32} et ds_{34} ont une robustesse de 100%. Ce résultat vient du fait que le temps négocié est supérieur au retard maximum $SMaxDelay$ qu'une livraison pouvait avoir sur un planning. Une négociation de 8.32 minutes est suffisante pour atteindre les mêmes valeurs pour les indicateurs de robustesse. Pour que les plannings ds_{27} et ds_{48} soient évalués avec une robustesse de 100%, le planificateur doit négocier un retard de 12.77 minutes et pour le planning ds_{46} , il est nécessaire de négocier 22.37 minutes pour le même résultat.

Conclusion

Ce chapitre a pour objectif d'illustrer les propositions faites précédemment. Il présente un cas d'étude basé sur les activités d'une entreprise de transport routier de marchandises. Pour permettre la sélection d'un planning journalier parmi plusieurs, nos indicateurs de robustesse permettent au planificateur de connaître les impacts des risques sur un planning. Les risques sont générés automatiquement sur l'ensemble des plannings de par notre proposition d'implémentation d'un portefeuille de dangers.

Les indicateurs de robustesse ont deux finalités. La première est de permettre au planificateur de sélectionner un planning lors de la comparaison avec d'autres plannings. La deuxième est de donner des informations au planificateur pour négocier avec le client dans l'objectif d'améliorer le planning et de pouvoir effectuer la sélection.

Ce cas d'étude illustre d'une part l'identification et l'évaluation automatiques des risques sur un ensemble de plannings dans le même contexte. Ce contexte est modélisé par notre portefeuille de dangers. D'autre part, les indicateurs de robustesse des différents plannings permettent au planificateur de choisir un planning et de négocier un délai de retard avec le client.

Le choix du planning dépend des attentes du planificateur qui peuvent être différentes pour chacun. Les seuils de tolérance choisis sont déterminés en fonction du planificateur et en fonction de la planification qu'il doit réaliser. Les indicateurs de robustesse permettent au planificateur de connaître le temps à négocier avec les clients dans le but d'améliorer ces indicateurs jusqu'aux seuils souhaités. Ainsi les illustrations de ce chapitre permettent d'observer que le planning sélectionné dépend des indicateurs de robustesse dont les valeurs peuvent varier en fonction du temps négocié avec le client.

Conclusion générale

Les activités réalisées par les acteurs du secteur du TRM sont soumises à de nombreux aléas. Ces aléas peuvent entraîner des modifications des tournées de livraison et du planning journalier et notamment modifier la durée de certaines activités. Lors de la création de ce planning journalier, le planificateur doit respecter les contraintes des clients et notamment l'heure de livraison. Les modifications de durée d'activités peuvent donc compromettre son travail en impactant le coût du planning mais également la satisfaction des clients. La difficulté pour le planificateur est donc de sélectionner un planning qui respecte les contraintes du client dans un contexte risqué.

Les travaux présentés dans ce mémoire essaient ainsi de répondre à la problématique : Comment aider un planificateur à choisir un planning dans un contexte risqué ?

Deux axes de recherche sont explorés, la prise en compte des risques et le développement d'indicateurs appropriés pour caractériser les tournées et plannings journaliers. Dans notre cas, le contexte risqué est représenté par des risques qui impactent les plannings. Ces plannings sont évalués selon des indicateurs permettant au planificateur de sélectionner celui qui correspond le mieux à ses attentes.

Dans le domaine du management des risques, le processus classique de gestion des risques comprend les étapes d'identification, d'évaluation, de traitement et de suivi des risques. Le planificateur ne dispose que d'un seul jour pour élaborer et sélectionner son planning et l'application de ce processus est très coûteuse en termes de temps nécessaire pour une application approfondie. Permettre une identification automatique des risques est donc indispensable pour que le planificateur puisse évaluer l'impact des risques sur le planning et sélectionner le meilleur planning.

Cette thèse propose l'implémentation de la notion de danger permettant, lorsqu'une activité de la tournée le rencontre, de générer un risque sur celle-ci puis d'évaluer les valeurs de probabilité et d'impact de ce risque. A partir du modèle de danger présenté dans ce mémoire basé sur la localisation des activités ainsi que du type d'activités, l'ensemble des risques impactant un planning est généré.

Pour l'axe de recherche sur les indicateurs, il s'agit de déterminer comment permettre au planificateur d'avoir confiance en un planning journalier lorsque celui-ci est réalisé dans un contexte risqué. Le besoin du planificateur est d'avoir des indicateurs lui permettant de définir si le planning répond aux attentes initiales. Ce mémoire présente les indicateurs du transport routier de marchandises. Cette étude a permis de montrer

l'importance de la satisfaction client. Un client qui n'est pas livré à l'heure peut en effet demander la planification d'une nouvelle livraison le lendemain, demander une pénalité financière compensatoire... Un planning confronté à un contexte risqué peut être perturbé. Ainsi, la satisfaction du client peut l'être également.

Pour montrer qu'un planning continue à respecter les exigences initiales malgré le contexte risqué, nous proposons des indicateurs de robustesse. La robustesse correspond à la capacité d'un système à résister à des perturbations. Trois indicateurs de robustesse sont proposés :

- $SMaxdelay_{ds}$: le délai maximum des livraisons du planning journalier ds à ajouter pour être conforme aux exigences horaires du client.
- $SProbRespect_{ds}(x)$: la probabilité de respect des contraintes horaires au niveau du planning journalier ds avec x minutes de délai.
- $SMinSat_{ds}(x)$: le pourcentage minimum de satisfaction des clients du planning journalier ds avec x minutes de délai.

Les indicateurs permettent de déterminer la probabilité que le planning initialement sélectionné ne soit pas modifié, de connaître le pourcentage minimum de clients qui ne sont pas impactés par les risques et de connaître les limites du planning grâce à l'indicateur de délai maximum.

Ces trois indicateurs sont décrits au niveau du planning et au niveau de la tournée. Ils permettent au planificateur de choisir un planning robuste mais fournissent également des informations pour alimenter le processus de négociation avec le client. Cette négociation a pour objectif d'améliorer un planning en négociant un délai de retard accepté pour les livraisons.

Cependant des hypothèses de travail formulées entraînent des limites à ces propositions. Voici la liste des restrictions présentes dans ce mémoire :

- L1 Les impacts des dangers sont uniquement sur la durée des activités.
- L2 Un seul risque par activité dans les scénarios de projet.
- L3 Les indicateurs de robustesse donnent une vision globale du planning.

Ces limites permettent d'identifier plusieurs perspectives que nous proposons de lister ci-dessous.

Pour les indicateurs du transport, nous proposons dans ce mémoire d'observer uniquement les indicateurs de robustesse pour l'analyse des scénarios de projet. La prise en compte des autres indicateurs (Eco, Env et STT) lors de ces scénarios peut permettre de voir si le planning conserve l'intérêt que le planificateur avait sélectionné au départ. Cette perspective s'intéresse à des aspects différents du temps pour les impacts des risques et permet de ne plus imposer la restriction L1.

Dans la gestion des risques, il est possible de s'intéresser à l'ensemble des scénarios de projet. Il faut pour cela étendre cette analyse aux actions correctives. Ces dernières jouent un rôle important dans la satisfaction client car, dans notre proposition, lorsqu'un scénario montre qu'une commande ne pouvait pas être livrée, l'ordre de planification n'est pas modifié. La conservation de l'ordre des livraisons peut engendrer

une insatisfaction client en cascade alors que le changement d'itinéraire pourrait simplement annuler une seule livraison. Cette perspective permettra d'enlever la restriction L2.

La difficulté par rapport aux propositions de ce mémoire est de déterminer l'ordre dans lequel les risques affectent une activité pour pouvoir utiliser l'arbre de probabilité pour déterminer les valeurs de probabilité et d'impact des risques.

Pour les indicateurs de robustesse, la perspective est de proposer un indicateur de robustesse par client évitant la restriction L3. Les indicateurs étant par client cela donnerait une vision sur le nombre de clients avec qui il faut négocier mais cela permet également de mettre des priorités en fonction des clients pour s'assurer que les clients correspondant à une part importante du chiffre d'affaires de l'entreprise soient entièrement satisfaits.

De nouveaux indicateurs, comme la résilience, mesurent le comportement du planning face à des perturbations. La résilience est la capacité d'un planning à absorber et réagir face aux perturbations. Cela permet de prendre en compte les scénarios ayant des actions correctives (L1) et d'appliquer cette vision par client pour connaître la satisfaction des clients (L3).

L'application dans d'autres domaines des propositions est envisageable. Le modèle de danger proposé est générique, cela permet d'adapter rapidement cette proposition à un autre domaine. A l'aide d'une base de données basée sur les problèmes déjà rencontrés dans les projets, cela permettrait d'obtenir des risques potentiels sur les futurs projets. La notion de robustesse étant clairement définie dans ce mémoire, une des perspectives serait de l'adapter à d'autres domaines comme par exemple les plannings de production.

Table des figures

1	Organisation du mémoire	3
1.1	Vision globale de la quantité de marchandises transportées en milieu maritime	7
1.2	Vision globale de la quantité de marchandises transportées par voie terrestre	8
1.3	Quantité de marchandises sur les voies terrestres en France (Sauvant, 2002)	9
1.4	Pourcentage de répartition des utilisations des voies terrestres en France (Sauvant, 2002)	10
1.5	Exemple d'un plan de transport	12
1.6	Processus de planification, niveau opérationnel	14
2.1	Robustesse Type 1	31
2.2	Robustesse Type 2	32
2.3	Robustesse Type 3	32
2.4	Différentes transformations des métriques de robustesse selon McPhail et al. (2017)	34
3.1	Entités d'une entreprise de transport	39
3.2	Modélisation des données d'une entreprise de transport routier, diagramme de classe UML	40
3.3	Structure d'un client	42
3.4	Diagramme de classe du client	43
3.5	Illustration d'un planning journalier	44
3.6	Illustration d'une tournée	44
3.7	Modèle de données de l'activité	46

3.8	Diagramme de classe des données relatives aux concepts tournée et planning journalier	47
3.9	Représentation du lien entre l'entreprise de transport et le client . . .	48
3.10	Modèle de données utilisé au format UML	48
3.11	Agrégation des valeurs des activités jusqu'à la tournée	50
3.12	Agrégation des valeurs des tournées jusqu'au planning journalier . . .	51
4.1	Scénario d'ingénierie des risques inspiré de Desroches (2013) et Desroches (2015)	57
4.2	Illustration d'un danger de bouchon	60
4.3	Application d'un scénario d'ingénierie des risques au domaine du transport routier de marchandises	60
4.4	Principe de génération d'un risque pour une activité de type statique	63
4.5	Génération de risque d'une activité de type dynamique	64
4.6	Génération multiple de risque pour une activité dynamique	65
4.7	Schéma des probabilités des scénarios de projet	67
4.8	Schéma des probabilités des scénarios de projet restreints	68
4.9	Schéma illustrant la répercussion de l'impact sur une activité Wait successeur direct	70
4.10	Schéma représentatif de l'absorption de l'impact d'un risque par une activité Wait	71
4.11	Schéma illustrant que l'impact n'est pas absorbé	71
4.12	Représentation d'une tournée sur une frise chronologique	72
5.1	Différence des indicateurs a priori et a posteriori	80
5.2	Proposition d'indicateurs pour caractériser la capacité d'un planning à respecter les engagements dans un contexte risqué	80
5.3	Représentation des retards de livraison par rapport aux scénarios de projet	83
5.4	Cartographie des indicateurs de robustesse avant négociation	88
5.5	Évolution rapide de l'indicateur $PR+$	89
5.6	Évolution lente de l'indicateur $PR+$	90
5.7	Évolution rapide de l'indicateur $PR-$	91
5.8	Évolution lente de l'indicateur $PR-$	91
5.9	Représentation du cas 3	92

5.10	Représentation du cas 4	92
5.11	Représentation du cas 5	93
5.12	Représentation du cas 6	93
6.1	Positionnement géographique des sites à livrer	99
6.2	Représentation des évaluations des 56 plannings journaliers	103

Liste des tableaux

2.1	Catégorisation des causes de perturbation d'un système de transport selon Mattsson et al. (2015)	27
2.2	Indicateurs du transport de marchandises selon Meier et al. (2013)	35
4.1	Représentation des estimateurs pour la partie fenêtre temporelle	61
4.2	Fonction de probabilité (%) $F_{probaA15}$	61
4.3	Fonction d'impact (minutes) $F_{impactA15}$	61
4.4	Fonction de probabilité (%) $F_{probaR1}$	72
4.5	Fonction de probabilité (%) $F_{probaR2}$	72
4.6	Fonction d'impact (minutes) $F_{impactR1}$	73
4.7	Fonction d'impact (minutes) $F_{impactR2}$	73
4.8	Récapitulatif des scénarios de projet	74
4.9	Évaluation des scénarios de projet	74
5.1	Indicateur du retard des scénarios de risques	82
5.2	Caractérisation des scénarios d'une tournée : probabilité d'occurrence et retard maximum	84
5.3	Indicateurs de probabilité des scénarios de projet	86
5.4	Négociation en fonction des différents cas observés	94
6.1	Liste des commandes	98
6.2	Description des dangers	101
6.3	Caractérisation de la probabilité et de l'impact des dangers	102
6.4	Évaluation des plannings	104
6.5	Indicateur de robustesse (pour $x=0$) détaillé pour chaque tournée de $ds27$	105

6.6	Indicateur de robustesse (pour $x=10$) détaillé pour chaque tournée de $ds27$	105
6.7	Indicateur de robustesse avec $x=0$	106
6.8	Évaluation des plannings selon ProbRespect(X) et Minsat(X)	109
6.9	Indicateur de robustesse avec $x=5$	110
6.10	Indicateur de robustesse avec $x=10$	111

Bibliographie

- (Agra et al., 2013) A. Agra, M. Christiansen, R. Figueiredo, L. M. Hvattum, M. Poss, and C. Requejo. “[The robust vehicle routing problem with time windows.](#)” In: *Computers & Operations Research*. Transport Scheduling 40.3 (Mar. 2013), pp. 856–866 (cf. p. 32).
- (Ai et al., 2009) T. J. Ai and V. Kachitvichyanukul. “[A particle swarm optimization for the vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery.](#)” In: *Computers & Operations Research*. Selected papers presented at the Tenth International Symposium on Locational Decisions (ISOLDE X) 36.5 (May 2009), pp. 1693–1702 (cf. p. 46).
- (Andersson et al., 2017) M. Andersson, M. Berglund, J. Flodén, C. Persson, and J. Waidringer. “[A method for measuring and valuing transport time variability in logistics and cost benefit analysis.](#)” In: *Research in Transportation Economics* 66 (Dec. 2017), pp. 59–69 (cf. p. 26).
- (Bahri et al., 2016) O. Bahri, N. B. Amor, and E.-G. Talbi. “[Robust Routes for the Fuzzy Multi-objective Vehicle Routing Problem.](#)” In: *IFAC-PapersOnLine*. 8th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control MIM 2016 49.12 (Jan. 2016), pp. 769–774 (cf. p. 28).
- (Bauchet, 1991) P. Bauchet. *Le Transport maritime*. fr. FeniXX, Jan. 1991 (cf. p. 6).
- (Benaben et al., 2017) F. Benaben, A. Montarnal, S. Truptil, M. Lauras, A. Fertier, N. Salatge, and S. Rebiere. “A conceptual framework and a suite of tools to support crisis management.” en. In: (2017), p. 10 (cf. p. 97).
- (Bertoluci, 2001) G. Bertoluci. “[Proposition d’une méthode d’amélioration de la cohérence des processus industriels.](#)” fr. In: (Dec. 2001) (cf. p. 23).
- (Bianchessi et al., 2007) N. Bianchessi and G. Righini. “[Heuristic algorithms for the vehicle routing problem with simultaneous pick-up and delivery.](#)” In: *Computers & Operations Research*. Reverse Logistics 34.2 (Feb. 2007), pp. 578–594 (cf. p. 42).
- (Bradley, 1978) J. V. Bradley. “[Robustness?](#)” en. In: *British Journal of Mathematical and Statistical Psychology* 31.2 (1978), pp. 144–152 (cf. p. 31).
- (Brans et al., 1985) J. P. Brans and P. Vincke. “A Preference Ranking Organisation Method: (The PROMETHEE Method for Multiple Criteria Decision-Making).” en. In: *Management Science* 31.6 (1985), pp. 647–656 (cf. p. 100).
- (BSI, 2000) BSI. *BS 6079-3:2000 - Project management. Guide to the management of business related project risk – BSI British Standards*. 2000 (cf. p. 21).

-
- (Canonne et al., 2013) S. Canonne and P. Petit. *La boîte à outils de l'acheteur / Stéphane Canonne, Philippe Petit*. français. La Boîte à outils (Paris. 2007). Dunod. Paris, 2013 (cf. p. 23).
- (Carter et al., 1996) B. Carter, T. Hancock, J. Morin, and N. Robin. *Introducing RISKMAN: the European project risk management methodology*. The Stationery Office, 1996 (cf. p. 24).
- (Célérier, 1965) P. Célérier. *Les ports maritimes*. fr. FeniXX, Jan. 1965 (cf. p. 6).
- (Chebbi et al., 2015) O. Chebbi and J. Chaouachi. “Multi-objective Iterated Greedy Variable Neighborhood Search Algorithm For Solving a full-load automated guided vehicle routing problem with battery constraints.” In: *Electronic Notes in Discrete Mathematics*. The 3rd International Conference on Variable Neighborhood Search (VNS'14) 47 (Feb. 2015), pp. 165–172 (cf. p. 28).
- (Chen et al., 2019) C. Chen, X. Shen, Q. Guo, and H. Sun. “Robust planning-operation co-optimization of energy hub considering precise model of batteries' economic efficiency.” In: *Energy Procedia*. Innovative Solutions for Energy Transitions 158 (Feb. 2019), pp. 6496–6501 (cf. p. 32).
- (Chow et al., 1994) G. Chow, L. E. Henriksson, and T. D. Heaver. “Logistics Performance: Definition and Measurement.” In: *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* 24.1 (Feb. 1994), pp. 17–28 (cf. p. 28).
- (Clément et al., 2018) A. Clément, F. Marmier, D. Kamissoko, D. Gourc, L. Wioland, V. Govaere, and J. Cegarra. “Robustesse, résilience : une brève synthèse des définitions au travers d'une analyse structurée de la littérature.” In: *MOSIM'18 - 12ème Conférence internationale de Modélisation, Optimisation et SIMulation*. Toulouse, France: ISAE and IMT Mines Albi, June 2018, 8 p. (Cf. p. 30, 31).
- (Cooper et al., 2005) D. Cooper, S. Grey, G. Raymond, and P. WalkerGopal. *Project Risk Management Guidelines: Managing Risk in Large Projects and Complex Procurements | Management Science / Operations Research | Management | Business & Management | Subjects | Wiley*. en-us. John Wiley and Son Ltd. 2005 (cf. p. 23, 25).
- (Crainic et al., 2004) T. G. Crainic, N. Ricciardi, and G. Storchi. “Advanced freight transportation systems for congested urban areas.” In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 12.2 (Apr. 2004), pp. 119–137 (cf. p. 14).
- (Dantzig et al., 1959) G. B. Dantzig and J. H. Ramser. “The Truck Dispatching Problem.” In: *Management Science* 6.1 (Oct. 1959), pp. 80–91 (cf. p. 28).
- (Demir et al., 2014) E. Demir, T. Bektaş, and G. Laporte. “The bi-objective Pollution-Routing Problem.” In: *European Journal of Operational Research* 232.3 (Feb. 2014), pp. 464–478 (cf. p. 28).
- (Derigs et al., 2014) U. Derigs and M. Pullmann. “Solving multitrip vehicle routing under order incompatibilities: A VRP arising in supply chain management.” In: *Networks* 64.1 (2014), pp. 29–39 (cf. p. 41).
- (Desroches, 2013) A. Desroches. “Le management des risques par l'analyse globale des risques.” In: *Transfusion Clinique et Biologique*. XVII congrès de la SFTS - Saint-Ouen l'Aumône 20.2 (May 2013), pp. 198–210 (cf. p. 56, 57).

- (Desroches, 2015) A. Desroches. *La gestion des risques: principes et pratiques*. fr. 3e édition. Paris: Lavoisier, 2015 (cf. p. 20, 25, 56, 57).
- (Duhamel et al., 2012) C. Duhamel, P. Lacomme, and C. Prodhon. “Problème de tournées de véhicules à flotte hétérogène limitée et gestion des stocks intégrée.” fr. In: (2012), p. 3 (cf. p. 40).
- (Dunlop et al., 2019) A. Dunlop, R. Colgan, A. Kirby, A. Ranger, and I. Blasiak-Wal. “Evaluation of organ motion-based robust optimisation for VMAT planning for breast and internal mammary chain radiotherapy.” In: *Clinical and Translational Radiation Oncology* 16 (May 2019), pp. 60–66 (cf. p. 32).
- (Eksioglu et al., 2009) B. Eksioglu, A. V. Vural, and A. Reisman. “The vehicle routing problem: A taxonomic review.” In: *Computers & Industrial Engineering* 57.4 (Nov. 2009), pp. 1472–1483 (cf. p. 42).
- (Esper et al., 2003) T. L. Esper, T. D. Jensen, F. L. Turnipseed, and S. Burton. “The Last Mile: An Examination of Effects of Online Retail Delivery Strategies on Consumers.” en. In: *Journal of Business Logistics* 24.2 (2003), pp. 177–203 (cf. p. 11).
- (Fabri et al., 2006) A. Fabri and P. Recht. “On dynamic pickup and delivery vehicle routing with several time windows and waiting times.” In: *Transportation Research Part B: Methodological* 40.4 (May 2006), pp. 335–350 (cf. p. 46).
- (Fan, 2011) J. Fan. “The Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery Based on Customer Satisfaction.” en. In: *Procedia Engineering* 15 (2011), pp. 5284–5289 (cf. p. 29).
- (Feillet et al., 2002) D. Feillet, P. Dejax, M. Gendreau, and C. Gueguen. “Vehicle Routing with Time Windows and Split Deliveries.” en. In: (2002), p. 3 (cf. p. 45).
- (Fertier, 2018) A. Fertier. “Interprétation automatique de données hétérogènes pour la modélisation de situations collaboratives: application à la gestion de crise.” en. In: (2018), p. 183 (cf. p. 56, 58, 97).
- (Geetha et al., 2013) S. Geetha, G. Poonthalir, and P. Vanathi. “Nested particle swarm optimisation for multi-depot vehicle routing problem.” en. In: *International Journal of Operational Research* 16.3 (2013), p. 329 (cf. p. 29).
- (Goel et al., 2013) A. Goel and T. Vidal. “Hours of Service Regulations in Road Freight Transport: An Optimization-Based International Assessment.” In: *Transportation Science* 48.3 (July 2013), pp. 391–412 (cf. p. 29).
- (Golden et al., 2008) B. L. Golden, S. Raghavan, and E. A. Wasil. *The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges*. en. Springer Science & Business Media, July 2008 (cf. p. 40).
- (Gourc, 2006) D. Gourc. “Vers un modèle général du risque pour le pilotage et la conduite des activités de biens et de services : Propositions pour une conduite des projets et une gestion des risques intégrées, Habilitation à Diriger des Recherches, Institut National Polytechnique de Toulouse.” Habilitation à Diriger des Recherches. Institut National Polytechnique de Toulouse, 2006 (cf. p. 20, 24, 26).

-
- (Güner et al., 2017) A. R. Güner, A. Murat, and R. B. Chinnam. “[Dynamic routing for milk-run tours with time windows in stochastic time-dependent networks.](#)” In: *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 97 (Jan. 2017), pp. 251–267 (cf. p. 45).
- (Gupta et al., 2012) A. Gupta, V. Nagarajan, and R. Ravi. “[Technical Note Approximation Algorithms for VRP with Stochastic Demands.](#)” In: *Operations Research* 60.1 (Feb. 2012), pp. 123–127 (cf. p. 41).
- (Haghani et al., 2005) A. Haghani and S. Jung. “[A dynamic vehicle routing problem with time-dependent travel times.](#)” In: *Computers & Operations Research* 32.11 (Nov. 2005), pp. 2959–2986 (cf. p. 46).
- (Ibanez et al., 2016) E. Ibanez, S. Lavrenz, K. Gkritza, D. A. Mejia-Giraldo, V. Krishnan, J. D. McCalley, and A. K. Somani. “[Resilience and robustness in long-term planning of the national energy and transportation system.](#)” In: *International Journal of Critical Infrastructures* 12.1-2 (2016). WOS:000378224300005, pp. 82–103 (cf. p. 30).
- (Iris et al., 2019) Ç. Iris and J. S. L. Lam. “[Recoverable robustness in weekly berth and quay crane planning.](#)” In: *Transportation Research Part B: Methodological* 122 (Apr. 2019), pp. 365–389 (cf. p. 32).
- (Isaksen, 1998) S. G. Isaksen. “A Review of Brainstorming Research: Six Critical Issues for Inquiry.” en. In: (1998), p. 28 (cf. p. 23).
- (ISO31000, 2018) ISO31000. *ISO 31000:2018(fr), Management du risque — Lignes directrices.* 2018 (cf. p. 20, 21).
- (I. ISO31000, 2009) I. ISO31000. “31000: 2009 Risk management—Principles and guidelines.” In: *International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland* (2009) (cf. p. 21).
- (Kaplan et al., 1981) S. Kaplan and B. J. Garrick. “[On The Quantitative Definition of Risk.](#)” en. In: *Risk Analysis* 1.1 (1981), pp. 11–27 (cf. p. 20).
- (Kea et al., 2015) B. Kea and B. C.-A. Sun. “[Consensus development for healthcare professionals.](#)” en. In: *Internal and Emergency Medicine* 10.3 (Apr. 2015), pp. 373–383 (cf. p. 23).
- (Knoflachner, 2007) H. Knoflachner. “[Success and failures in urban transport planning in Europe—understanding the transport system.](#)” en. In: *Sadhana* 32.4 (Aug. 2007), pp. 293–307 (cf. p. 14).
- (Köhler et al., 2019) C. Köhler and J. Haferkamp. “[Evaluation of delivery cost approximation for attended home deliveries.](#)” In: *Transportation Research Procedia.* 21st EURO Working Group on Transportation Meeting, EWGT 2018, 17th – 19th September 2018, Braunschweig, Germany 37 (Jan. 2019), pp. 67–74 (cf. p. 15).
- (Kovacs et al., 2015) A. A. Kovacs, S. N. Parragh, and R. F. Hartl. “[The multi-objective generalized consistent vehicle routing problem.](#)” In: *European Journal of Operational Research* 247.2 (Dec. 2015), pp. 441–458 (cf. p. 28).

- (Laurent et al., 2007) B. Laurent and J.-K. Hao. “Simultaneous vehicle and driver scheduling: A case study in a limousine rental company.” In: *Computers & Industrial Engineering* 53.3 (Oct. 2007), pp. 542–558 (cf. p. 39).
- (Lee et al., 2012) C. Lee, K. Lee, and S. Park. “Robust vehicle routing problem with deadlines and travel time/demand uncertainty.” In: *Journal of the Operational Research Society* 63.9 (Sept. 2012), pp. 1294–1306 (cf. p. 42).
- (Leobons et al., 2019) C. M. Leobons, V. B. Gouvêa Campos, and R. A. d. Mello Bandeira. “Assessing Urban Transportation Systems Resilience: A Proposal of Indicators.” In: *Transportation Research Procedia*. 21st EURO Working Group on Transportation Meeting, EWGT 2018, 17th – 19th September 2018, Braunschweig, Germany 37 (Jan. 2019), pp. 322–329 (cf. p. 26).
- (Lera-Romero et al., 2019) G. Lera-Romero and J. J. Miranda-Bront. “A branch and cut algorithm for the time-dependent profitable tour problem with resource constraints.” In: *European Journal of Operational Research* (July 2019) (cf. p. 45).
- (Li et al., 2010) X. Li, P. Tian, and S. C. H. Leung. “Vehicle routing problems with time windows and stochastic travel and service times: Models and algorithm.” In: *International Journal of Production Economics* 125.1 (May 2010), pp. 137–145 (cf. p. 39).
- (Liebchen et al., 2009) C. Liebchen, M. Lübbecke, R. Möhring, and S. Stiller. “The Concept of Recoverable Robustness, Linear Programming Recovery, and Railway Applications.” en. In: *Robust and Online Large-Scale Optimization: Models and Techniques for Transportation Systems*. Ed. by R. K. Ahuja, R. H. Möhring, and C. D. Zaroliagis. Lecture Notes in Computer Science. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009, pp. 1–27 (cf. p. 32).
- (Litcanu et al., 2015) M. Litcanu, O. Prostean, C. Oros, and A. V. Mnerie. “Brain-Writing Vs. Brainstorming Case Study For Power Engineering Education.” In: *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. The Proceedings of 6th World Conference on educational Sciences 191 (June 2015), pp. 387–390 (cf. p. 23).
- (Lowrance, 1976) W. W. Lowrance. “Of Acceptable Risk: Science and the Determination of Safety.” en. In: (1976) (cf. p. 20).
- (Marmier et al., 2014) F. Marmier, I. Filipas-Deniaud, and D. Gourc. “Strategic decision-making in NPD projects according to risk: application to satellites design projects.” Anglais. In: *Computers in Industry* published online (2014) (cf. p. 25, 97).
- (Marmier et al., 2013) F. Marmier, D. Gourc, and F. Laarz. “A risk oriented model to assess strategic decisions in new product development projects.” In: *Decision Support Systems* 56 (2013), pp. 74–82 (cf. p. 25, 65, 66).
- (Mattsson et al., 2015) L.-G. Mattsson and E. Jenelius. “Vulnerability and resilience of transport systems – A discussion of recent research.” In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. Resilience of Networks 81 (Nov. 2015), pp. 16–34 (cf. p. 26, 27).
- (McPhail et al., 2017) C. McPhail, H. R. Maier, J. H. Kwakkel, M. Giuliani, A. Castelletti, and S. Westra. “Robustness Metrics: How Are They Calculated, When Should They Be Used and Why Do They Give Different Results?” en. In: *Earth’s Future* (2017), pp. 169–191 (cf. p. 33, 34).

-
- (Meier et al., 2013) H. Meier, H. Lagemann, F. Morlock, and C. Rathmann. “Key Performance Indicators for Assessing the Planning and Delivery of Industrial Services.” In: *Procedia CIRP*. 2nd International Through-life Engineering Services Conference 11 (Jan. 2013), pp. 99–104 (cf. p. 15, 29, 35).
- (MIL-STD-882D, 2000) MIL-STD-882D. *Department of defense standard practice system safety Environment, Safety, and Occupational Health Risk Management Methodology for Systems Engineering*. Tech. rep. 2000 (cf. p. 20).
- (Montoya-Torres et al., 2016) J. R. Montoya-Torres, A. Muñoz-Villamizar, and C. A. Vega-Mejía. “On the impact of collaborative strategies for goods delivery in city logistics.” In: *Production Planning & Control* 27.6 (Apr. 2016), pp. 443–455 (cf. p. 11, 13).
- (Montreuil, 2011) B. Montreuil. “Toward a Physical Internet: meeting the global logistics sustainability grand challenge.” en. In: *Logistics Research* 3.2 (May 2011), pp. 71–87 (cf. p. 14).
- (Murphy et al., 1998) Murphy, Black, Lamping, McKee, Sanderson, Askham, and Marteau. “Consensus development methods, and their use in clinical guideline development.” en. In: *Health Technology Assessment* 2.3 (1998) (cf. p. 24).
- (Nguyen et al., 2013) T.-H. Nguyen, F. Marmier, and D. Gourc. “A decision-making tool to maximize chances of meeting project commitments.” In: *International Journal of Production Economics* 142.2 (Apr. 2013), pp. 214–224 (cf. p. 25, 97).
- (Patier et al., 2010) D. Patier and J.-L. Routhier. “Une méthode d’enquête du transport de marchandises en ville pour un diagnostic en politiques urbaines.” fr. In: (2010), p. 29 (cf. p. 29).
- (Pavard et al., 2009) B. Pavard, J. Dugdale, N. B.-B. Saoud, S. Darcy, and P. Salembier. *Conception de systèmes socio techniques robustes*. fr. Octarès Editions, Apr. 2009 (cf. p. 30).
- (Perl et al., 1985) J. Perl and M. S. Daskin. “A warehouse location-routing problem.” In: *Transportation Research Part B: Methodological* 19.5 (Oct. 1985), pp. 381–396 (cf. p. 38).
- (PMBOK, 2013) PMBOK. *PMBOK Guide, Fifth Edition*. 2013 (cf. p. 21).
- (Rath et al., 2014) S. Rath and W. J. Gutjahr. “A math-heuristic for the warehouse location–routing problem in disaster relief.” In: *Computers & Operations Research*. Multiple Criteria Decision Making in Emergency Management 42 (Feb. 2014), pp. 25–39 (cf. p. 38).
- (Rodrigue, 2017) J.-P. Rodrigue. “Transportation and Disasters.” In: *The Geography of Transport Systems*. Fourth Edition, 2017 (cf. p. 26).
- (Rodrigue et al., 2016) J.-P. Rodrigue, C. Comtois, and B. Slack. *The Geography of Transport Systems*. Anglais. 4th ed. London ; New York: Routledge, Nov. 2016 (cf. p. 26).
- (Rongier, 2012) C. Rongier. “Gestion de la réponse à une crise par la performance : vers un outil d’aide à la décision. Application à l’humanitaire.” fr. In: (2012), p. 233 (cf. p. 20).

- (Ruiz et al., 2019) E. Ruiz, V. Soto-Mendoza, A. E. Ruiz Barbosa, and R. Reyes. “Solving the open vehicle routing problem with capacity and distance constraints with a biased random key genetic algorithm.” In: *Computers & Industrial Engineering* 133 (July 2019), pp. 207–219 (cf. p. 46).
- (Saaty, 1995) T. L. Saaty. “Transport planning with multiple criteria: The analytic hierarchy process applications and progress review.” en. In: *Journal of Advanced Transportation* 29.1 (1995), pp. 81–126 (cf. p. 100).
- (Sauvant, 2002) A. Sauvant. “Volume et partage modal du transport de marchandises en France de 1845 à nos jours.” fr. In: *Notes de Synthèse du SES* (2002), p. 8 (cf. p. 8–10).
- (Schoen et al., 2018) Q. Schoen, D. Pinon-Baca, M. Lauras, F. Fontanili, and S. Truptil. “A new transport management system design considering the upcoming logistics environment and the sensitive products supply chains.” en. In: June 2018, p.286–295 (cf. p. 16).
- (Shyu et al., 2004) S. J. Shyu, B. M. T. Lin, and P. Y. Yin. “Application of ant colony optimization for no-wait flowshop scheduling problem to minimize the total completion time.” In: *Computers & Industrial Engineering* 47.2 (Nov. 2004), pp. 181–193 (cf. p. 46).
- (Sotic et al., 2015) A. Sotic and R. Rajic. “The Review of the Definition of Risk.” en. In: 3.3 (2015), p. 10 (cf. p. 21).
- (Stanitsas et al., 2019) M. Stanitsas, K. Kirytopoulos, and E. Vareilles. “Facilitating sustainability transition through serious games: A systematic literature review.” In: *Journal of Cleaner Production* 208 (Jan. 2019), pp. 924–936 (cf. p. 52).
- (Sungur et al., 2008) I. Sungur, F. Ordóñez, and M. Dessouky. “A robust optimization approach for the capacitated vehicle routing problem with demand uncertainty.” In: *IIE Transactions* 40.5 (Mar. 2008), pp. 509–523 (cf. p. 32).
- (Szymon et al., 2013) J. Szymon and Ž. Dominik. “Solving Multi-criteria Vehicle Routing Problem by Parallel Tabu Search on GPU.” In: *Procedia Computer Science*. 2013 International Conference on Computational Science 18 (Jan. 2013), pp. 2529–2532 (cf. p. 15).
- (Thaman et al., 2017) J. Thaman and M. Singh. “Green cloud environment by using robust planning algorithm.” en. In: *Egyptian Informatics Journal* 18.3 (Nov. 2017), pp. 205–214 (cf. p. 32).
- (Tixier et al., 2002) J. Tixier, G. Dusserre, O. Salvi, and D. Gaston. “Review of 62 risk analysis methodologies of industrial plants.” In: *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 15.4 (July 2002), pp. 291–303 (cf. p. 24).
- (Toth et al., 2002) P. Toth and D. Vigo. “Models, relaxations and exact approaches for the capacitated vehicle routing problem.” In: *Discrete Applied Mathematics* 123.1 (Nov. 2002), pp. 487–512 (cf. p. 40).
- (Urruty et al., 2016) N. Urruty, D. Tailliez-Lefebvre, and C. Huyghe. “Stability, robustness, vulnerability and resilience of agricultural systems. A review.” In: *Agronomy for sustainable development* 36.1 (Mar. 2016) (cf. p. 30).

-
- (Ventroux, 2016) J. Ventroux. “[Helps to control risks associated with contracting and execution of an oil complex project.](#)” Theses. Université Paris-Saclay, Nov. 2016 (cf. p. 25).
- (Venturelli et al., 2006) N. Venturelli and P. Miani. *Transport Logistique*. Paris, Editions Le génie des glaciers. 2006 (cf. p. 6, 9).
- (Vidal, 2013) T. Vidal. “Approches générales de résolution pour les problèmes multi-attributs de tournées de véhicules et confection d’horaires.” en. In: (Apr. 2013) (cf. p. 29).
- (Ward et al., 2003) S. Ward and C. Chapman. “[Transforming project risk management into project uncertainty management.](#)” In: *International Journal of Project Management* 21.2 (Feb. 2003), pp. 97–105 (cf. p. 24).
- (Westland, 2007) J. Westland. *The Project Management Life Cycle: A Complete Step-by-step Methodology for Initiating Planning Executing and Closing the Project*. en. Kogan Page Publishers, Jan. 2007 (cf. p. 14).
- (Woudenberg, 1991) F. Woudenberg. “[An evaluation of Delphi.](#)” In: *Technological Forecasting and Social Change* 40.2 (Sept. 1991), pp. 131–150 (cf. p. 23).
- (Wu et al., 2017) L. Wu, M. Hifi, and H. Bederina. “[A new robust criterion for the vehicle routing problem with uncertain travel time.](#)” In: *Computers & Industrial Engineering* 112 (Oct. 2017), pp. 607–615 (cf. p. 32).
- (Zhang et al., 2012) J. Zhang, W. Wang, Y. Zhao, and C. Cattani. *Multiobjective Quantum Evolutionary Algorithm for the Vehicle Routing Problem with Customer Satisfaction*. en. Research article. 2012 (cf. p. 29).

Table des matières

<i>Remerciements</i>	iii
<i>Sommaire</i>	v
<hr/>	
Introduction générale	1
1 Transport routier de marchandises : contexte, enjeux et problématique	5
Introduction	5
1.1 Le transport de marchandises	5
1.1.1 Les différents modes de transport	6
1.1.2 Augmentation du volume de marchandises transportées	7
1.1.3 La livraison au client final	9
1.2 La gestion de la livraison dernier kilomètre	11
1.2.1 Les différentes prises de décision	11
1.2.2 Planification et outils de planification	12
1.3 Les étapes d'une planification opérationnelle	14
1.3.1 Phase de création de planning	15
1.3.2 Phase d'évaluation a priori de planning	15
1.3.3 Phase de sélection du planning	15
1.3.4 Phase d'exécution en temps réel	15
1.3.5 Phase d'évaluation a posteriori du planning	16
Conclusion	16
2 État de l'art sur les risques et les indicateurs	19
Introduction	19
2.1 La notion de risque	20
2.1.1 Définitions	20
2.1.2 Processus de management des risques	21
2.1.3 Exemples de méthodes pour outiller le processus de management des risques	22
2.1.4 Les risques dans le transport routier de marchandises	26
2.2 Évaluation de la résistance d'un planning	27
2.2.1 Système classique d'évaluation	28
2.2.2 Indicateurs dans le domaine du transport	28

2.2.3	Indicateur pour exprimer la résistance aux perturbations: la robustesse	30
	Conclusion	33
3	Notation et modélisation d'un planning dans le domaine	
du TRM	37
	Introduction	37
3.1	Structuration des concepts et présentation des modèles de données manipulés	38
3.1.1	Modélisation de l'entreprise de transport	38
3.1.2	La modélisation du client	41
3.1.3	Modélisation des tournées et plannings journaliers	44
3.1.4	Synthèse du modèle de données	47
3.2	Évaluation des tournées et du planning journalier	49
3.2.1	Évaluation des tournées : mécanisme de calcul des indicateurs	49
3.2.2	Évaluation des plannings journaliers	50
3.2.3	Illustration des attributs et des indicateurs	51
	Conclusion	52
4	Génération automatique des risques à partir d'un portefeuille de dangers	
	55
	Introduction	55
4.1	Définition du concept de danger	56
4.1.1	Présentation du concept de danger	56
4.1.2	Application au transport routier de marchandises	58
4.2	Génération des risques	62
4.2.1	Génération d'un risque pour les activités de type statique	63
4.2.2	Génération d'un risque pour les activités de déplacement	63
4.2.3	Structuration de la proposition	64
4.3	Génération des scénarios de projet	65
4.3.1	La représentation des scénarios de projet	65
4.3.2	Application de nos hypothèses restrictives à la construction des scénarios de projet	68
4.4	Évaluation des scénarios de projet	69
4.4.1	Les activités Wait jouent le rôle de tampon	69
4.4.2	Exemple des scénarios de projet sur une tournée	71
4.4.3	Analyse des résultats des scénarios sur une tournée	73
	Conclusion	74
5	Proposition d'indicateurs de robustesse	
	77
	Introduction	77
5.1	Les attentes du planificateur	79
5.1.1	Un constat sur les indicateurs du planning	79
5.1.2	De nouveaux indicateurs pour caractériser les plannings journaliers dans un contexte risqué	79
5.2	Proposition d'indicateurs de robustesse dans le TRM	81

5.2.1	La robustesse au niveau d'un planning et d'une tournée	81
5.2.2	Définir les limites d'un planning	81
5.2.3	Mesurer la satisfaction du client	83
5.3	Démarche d'utilisation des indicateurs de robustesse	86
5.3.1	Représentation des indicateurs de robustesse	87
5.3.2	Négociation avec le client	89
	Conclusion	94
6	Cas d'application : planification d'une livraison dernier kilomètre	95
	Introduction	95
6.1	Implémentation des contributions	96
6.1.1	Le projet SMART PLANNING	96
6.1.2	Le prototype RIO-Suite	97
6.2	Les données manipulées par le planificateur	97
6.2.1	Les données de planification	98
6.2.2	La génération des plannings journaliers	99
6.2.3	Les dangers pris en compte	101
6.3	Évaluation des plannings journaliers	103
6.3.1	Évaluation des indicateurs (Eco, Env et SST)	103
6.3.2	Illustration des indicateurs de robustesse au niveau des tournées	104
6.3.3	Illustration des indicateurs de robustesse au niveau planning journalier	106
6.4	Interprétation des indicateurs de robustesse	106
6.4.1	Comparaison des plannings sans négociation	106
6.4.2	Courbes des indicateurs de robustesse des plannings sélectionnés	107
6.4.3	Comparaison des plannings avec une négociation de 5 et 10 minutes	110
	Conclusion	111
	Conclusion générale	113
	<i>Table des figures</i>	<i>117</i>
	<i>Liste des tableaux</i>	<i>121</i>
	<i>Bibliographie</i>	<i>123</i>
	<i>Table des matières</i>	<i>131</i>

Abstract

Proposal of robustness indicators based on risks consideration in order to evaluate tours for road freight transport

The work presented in this thesis aims to answer a problem of decision support for the selection of a delivery schedule in the field of road freight transport and, particularly, for the last mile delivery. The role of the planner is crucial to ensure the respect of the customer's requirements and the success of the transport company. More than building a feasible planning, the planner must select, among several possible schedules, the one that ensures the best efficiency of the resources of the company whatever the situations to come. Indeed, tours are frequently confronted with a multitude of disturbances, whether endogenous or exogenous.

The problem addressed in this thesis is: "How to help a planner to select a schedule in a risky context?"

Two main contributions are presented in this thesis.

Our first contribution aims to propose a mechanism for automatic identification and evaluation of the risks related to a daily delivery schedule. These mechanisms are based on the characterization of generic dangers that can be automatically instantiated on a delivery schedule activity based on contextual characteristics of this activity. Thus, when a planning activity is confronted with a danger, a risk is generated on this activity to materialize the execution deviations (delays) generated by the disruptive event. A methodology for evaluating the impact of risks on the execution of the tours and risk scenarios, based on the characteristics (probability, impacts) of each risk, is also presented.

Our second contribution consists of the proposal of specific indicators (the maximum delay of a delivery, the probability of respecting constraints of hour for the customer and the minimum of satisfactions) to measure the robustness of the delivery schedules in the face of the disturbances and a methodology for exploiting these indicators. The proposed indicators measure of the capacity of the schedule to meet the customer's requirements (quantity delivered, delivery schedule). An approach to exploit these indicators in the phase of selecting a schedule as in the aid to the negotiation of flexibility with the client is proposed.

The work of this thesis is part of the ANR (National Research Agency) SMART PLANNING project. A case study from the project partner companies illustrates the contributions.

KEYWORDS: Robustness, Risk identification, Danger, Decision making, Last mile delivery

Résumé

Proposition d'indicateurs de robustesse basés sur la prise en compte des risques afin d'évaluer les tournées de transport routier de marchandises

Les travaux présentés dans ce mémoire visent à répondre à une problématique d'aide à la décision pour la sélection d'un planning de livraison dans le domaine du transport routier de marchandise et plus particulièrement pour la livraison du dernier kilomètre. Le rôle du planificateur est crucial pour assurer le respect des exigences du client et la pérennité de l'entreprise de transport. Plus que construire un planning faisable, le planificateur doit sélectionner, parmi plusieurs plannings possibles, celui qui assure la meilleure efficacité des ressources de l'entreprise quelles que soient les situations à venir. En effet, la réalisation des tournées est fréquemment confrontée à une multitude de perturbations qu'elles soient endogènes ou exogènes.

La problématique adressée dans ce mémoire est : « Comment aider un planificateur à sélectionner un planning dans un contexte risqué ? »

Deux contributions principales sont présentées dans ce mémoire.

Notre première contribution vise à proposer un mécanisme d'identification et d'évaluation automatiques des risques relatifs à un planning journalier de livraison. Ces mécanismes s'appuient sur la caractérisation de dangers génériques qui pourront être instanciés automatiquement sur une activité du planning de livraison en fonction de caractéristiques contextuelles de cette activité. Ainsi, lorsqu'une activité du planning est confrontée à un danger, un risque est généré sur cette activité pour matérialiser les déviations d'exécution (retard) engendrées par l'événement perturbateur. Une méthodologie d'évaluation de l'impact des risques sur la réalisation des tournées et des scénarios de risques, basée sur les caractéristiques (probabilité, impacts) de chaque risque, est également présentée.

Notre deuxième contribution consiste en la proposition d'indicateurs spécifiques (le retard maximum d'une livraison, la probabilité de respecter les contraintes horaires du client et le minimum de satisfactions) pour mesurer la robustesse des plannings de livraison face aux perturbations et d'une méthodologie d'exploitation de ces indicateurs. Les indicateurs proposés permettent de mesurer la capacité du planning à respecter les exigences du client (quantité livrée, horaire de livraison). Une démarche d'exploitation de ces indicateurs dans la phase de sélection d'un planning comme dans l'aide à la négociation de flexibilité avec le client est proposée.

Les travaux de ce mémoire s'inscrivent dans le cadre du projet ANR (Agence Nationale de la Recherche) SMART PLANNING. Un cas d'étude provenant des entreprises partenaires du projet permet d'illustrer les contributions.

MOTS-CLÉS : Robustesse, Identification de risques, Danger, Aide à la décision, Livraison dernier kilomètre.